

Wstęp do Synchrotronów

Adriana Wawrzyniak

Kraków, 19.10.2026

Narodowe Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS

Uniwersytet Jagielloński, Kraków

adriana.wawrzyniak@uj.edu.pl

Plan wykładu

I Wstęp

II Synchrotron: budowa, historia, wiązka elektronów

III Promieniowanie synchrotronowe: źródła, widmo, właściwości

IV Zastosowania: metody i przykłady badań na synchrotronach

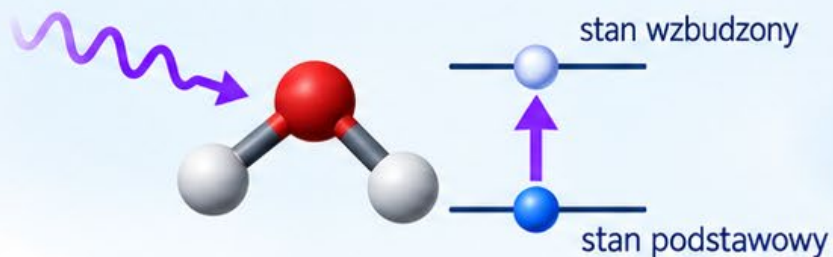
V Podsumowanie

Narodowe Centrum Promieniowania Synchrotronowego SOLARIS

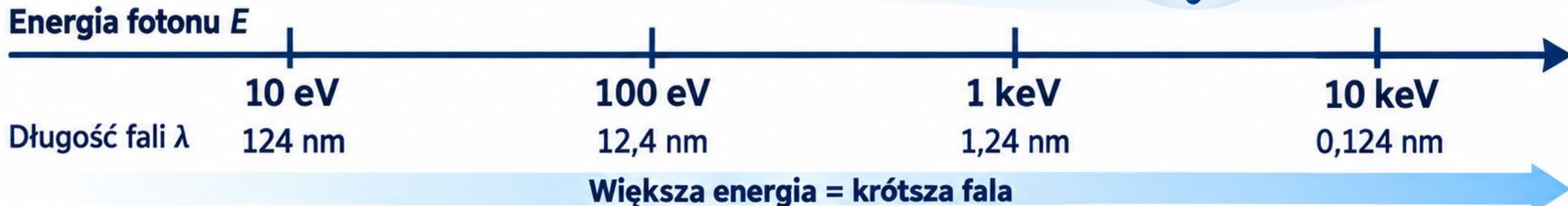
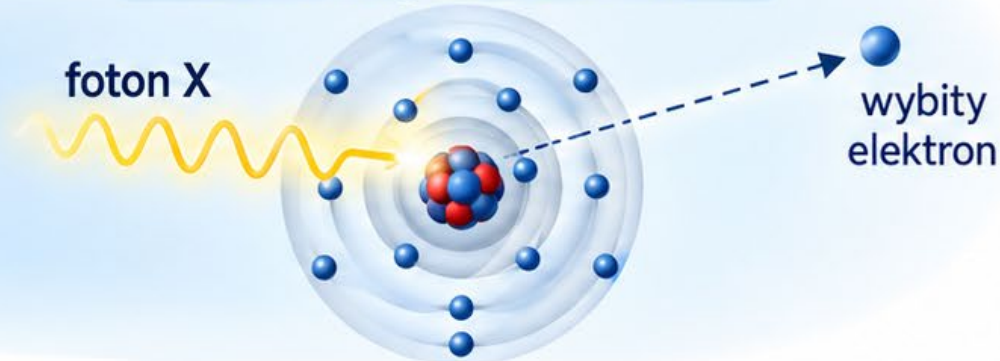


Dlaczego potrzebujemy promieniowania X?

Elektrony walencyjne i wiązania

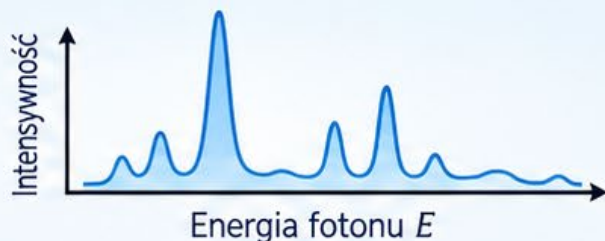


Elektrony rdzeniowe

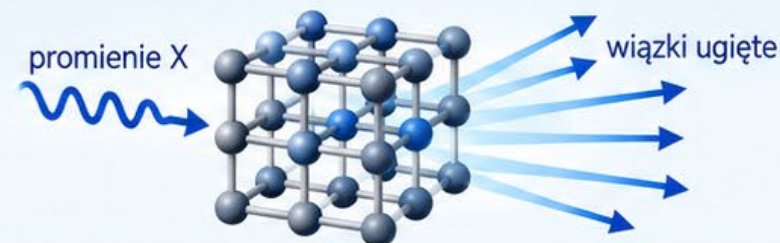


Zakresy energii zależą od pierwiastka i rodzaju przejścia.

Spektroskopia:
skład i stan chemiczny



Dyfrakcja:
ułożenie atomów



$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$E [\text{keV}] \approx \frac{1,24}{\lambda [\text{nm}]}$$

Krótkie fale pozwalają badać strukturę w skali atomowej.

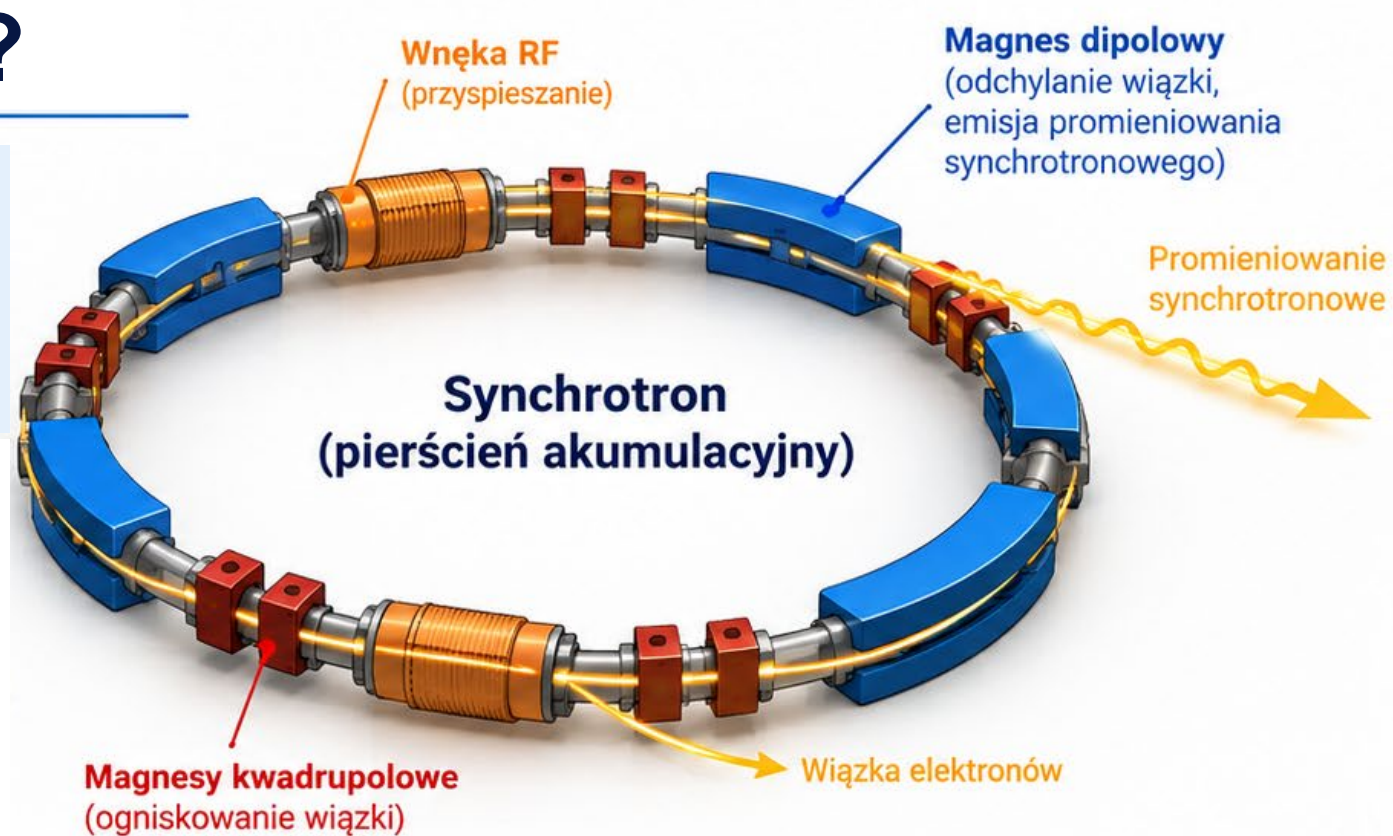
Czym jest synchrotron?

Synchrotron to akcelerator kołowy. Cząstki naładowane krążą po zamkniętej orbicie, a pola magnetyczne i elektryczne kontrolują ich ruch oraz energię.

W źródłach światła, takich jak SOLARIS, krążącymi cząstkami są elektrony.

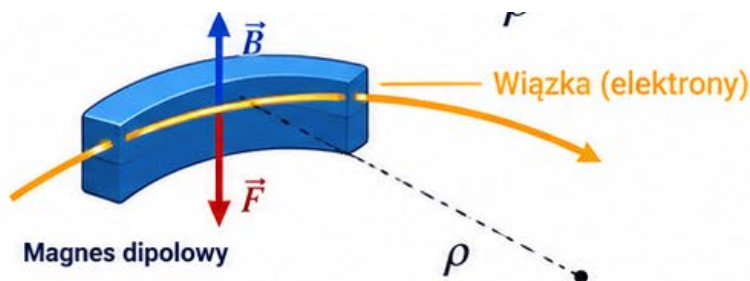
Magnesy dipolowe zakrzywiają orbitę, a kwadrupole ogniskują wiązkę.

Pole elektryczne we wnękach RF dostarcza energii. Cząstki docierają do wnęki we właściwej fazie pola.



Siła Lorentza – utrzymanie na orbicie

$$F = |q|vB = pv/\rho$$



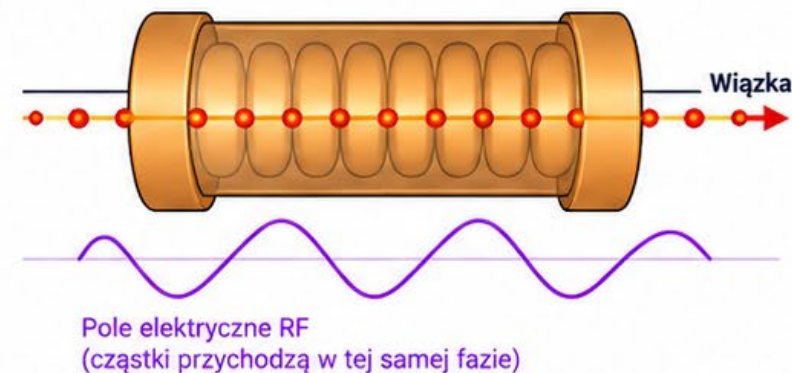
Sztywność magnetyczna

Określa, jak silne pole magnetyczne potrzeba, aby zakrzywić cząstkę o danym pędzie:

$$B\rho \text{ [Tm]} = 3.3356 p [\text{GeV}/c]$$

B – indukcja pola magnetycznego [T]
 ρ – promień zakrzywienia [m]
 p – pęd cząstki [GeV/c]

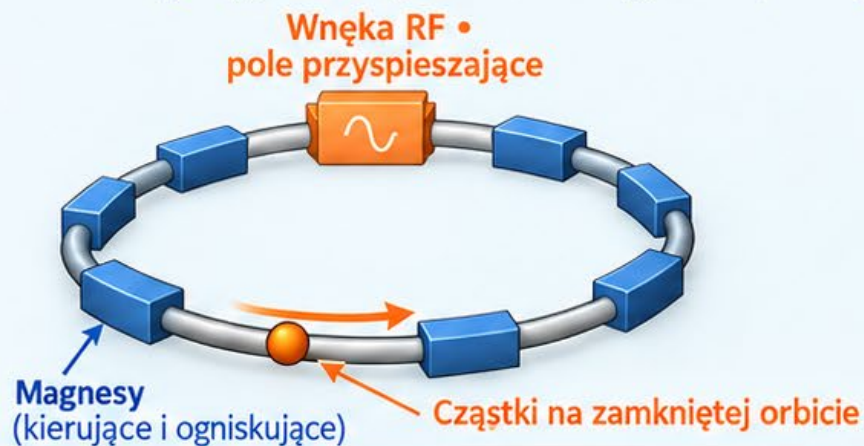
Przyspieszanie w wnęcie RF



Synchrotron: synchronizacja i pierwsza obserwacja światła

„Synchrotron” — od synchronizacji

Greckie *sýn* („razem”) + *chrónos* („czas”) → synchroniczny

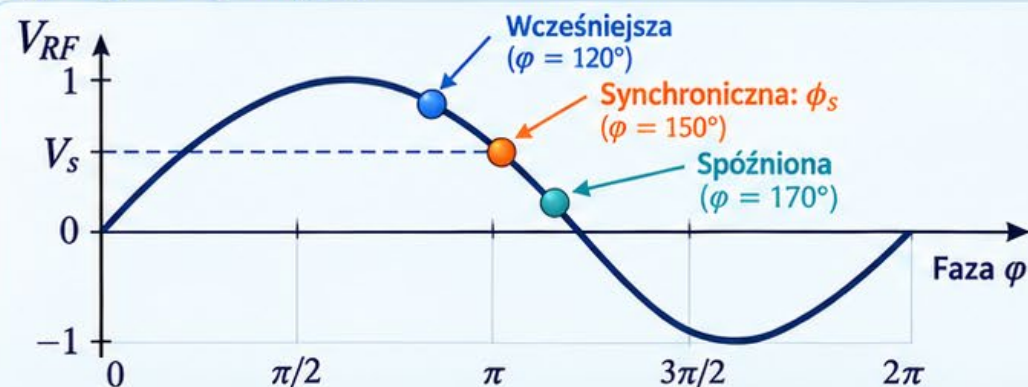


$$E_z(t) = E_0 \sin(\omega_{RF} t + \phi_0)$$

$$f_{RF} = h f_{ob}$$

E_z — pole elektryczne
we wnęcie;
 h — liczba harmoniczna.

$$p = |q| B \rho$$



$$\Delta W_s = |q| V_{RF} \sin \phi_s$$

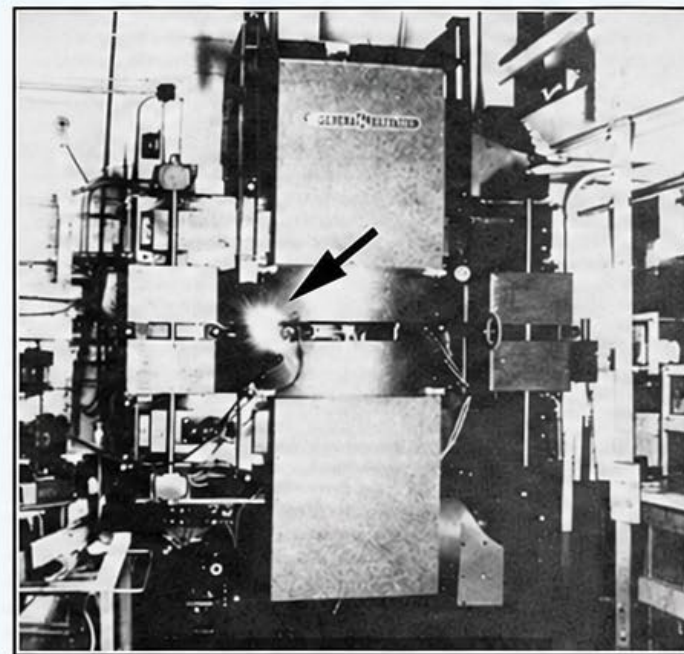
Konwencja: dodatnie V_{RF} oznacza przyrost energii cząstki.

Cząstka synchroniczna wraca do wnęki w tej samej fazie RF.

Przykład stabilnego zbocza dla $\eta > 0$; η — współczynnik poślizgu.

W pierścieniu magazynującym RF uzupełnia straty energii.

1947 • obserwacja w laboratorium



24 kwietnia 1947

General Electric • Schenectady (USA)

Synchrotron elektronowy: 70 MeV

Widzialne promieniowanie nazwano od akceleratora, w którym je obserwowano.

RF synchronizuje ruch cząstek; magnesy utrzymują orbitę.

Historia synchrotronów

4. generacja Współczesne źródła

Synchrotrony o bardzo niskiej emitancji wiązki elektronowej
Ekstremalnie wysoka jasność i koherencja

- Zaawansowane układy MBA i technologie magnesów
- Lasery na swobodnych elektronach (FEL – Free-Electron Lasers)
- Wysoka koherencja i bardzo krótki czas trwania impulsów

3. generacja od lat 90.

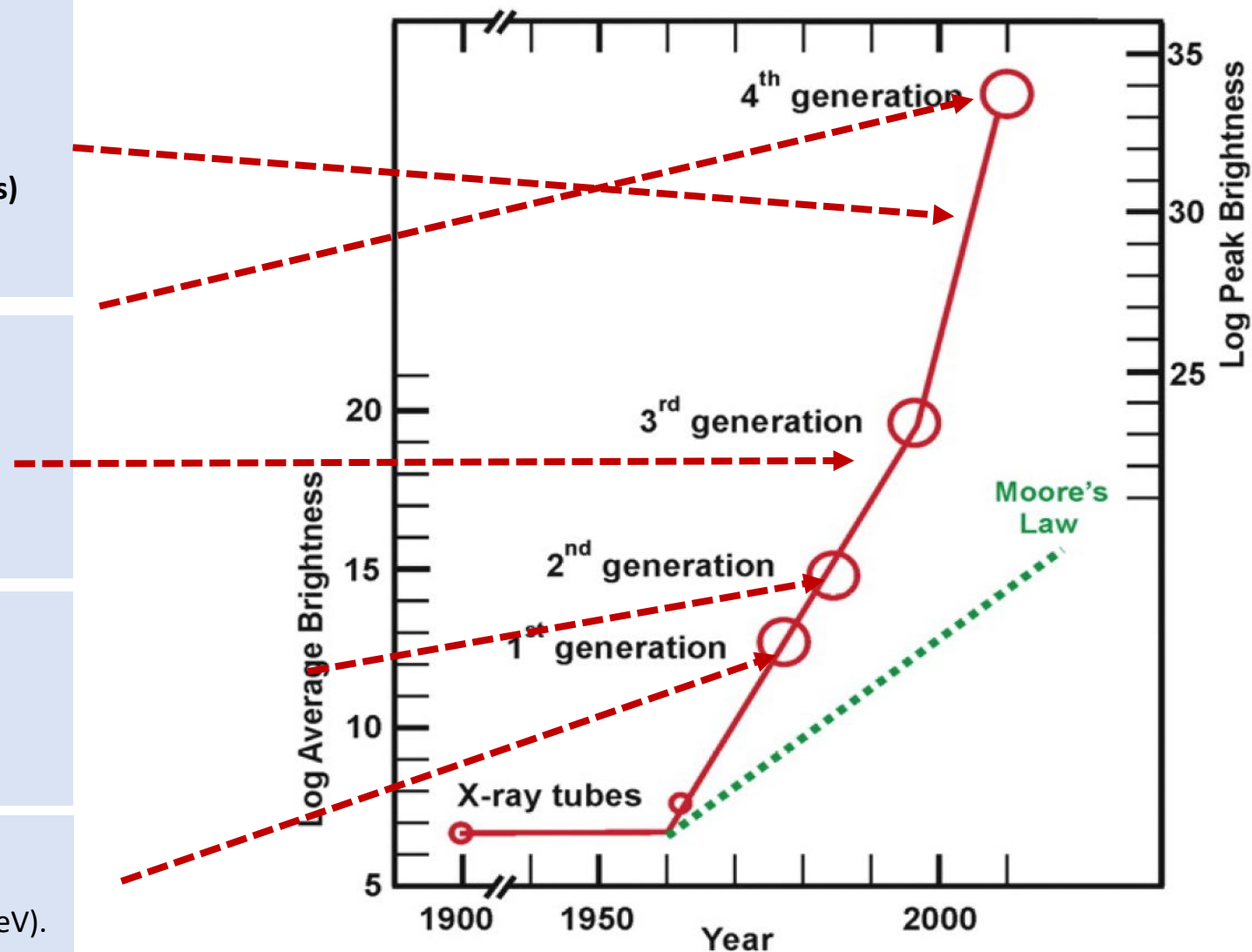
- Optymalizacja pod kątem wysokiej średniej jasności wiązki
- Mniejsze rozmiary wiązki elektronowej
- Układy magnesów undulatorowych
- Wielostanowiskowe źródła promieniowania
- Niska koherencja

2. generacja lata 70. i 80.

Pierwsze akceleratory projektowane specjalnie jako źródła promieniowania synchrotronowego.

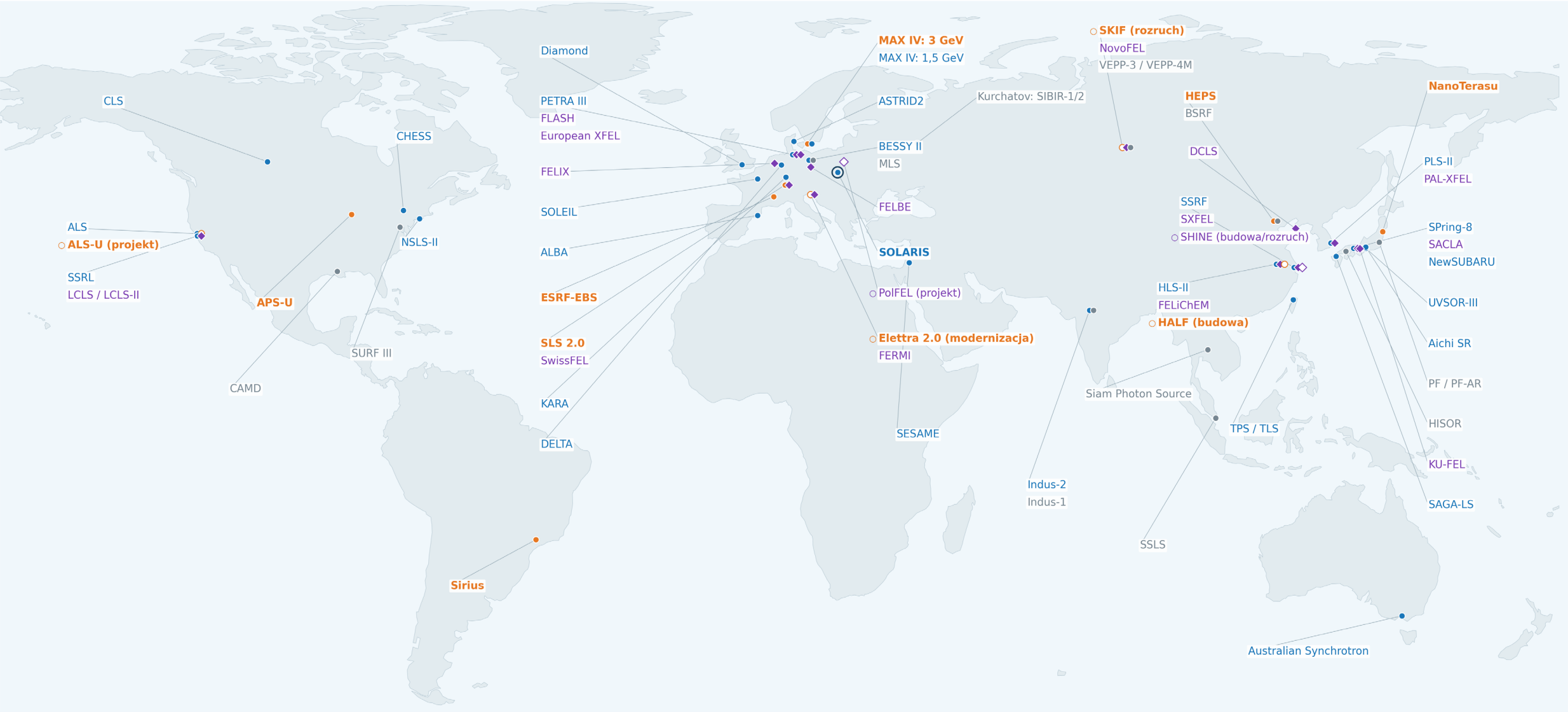
Magnesy dipolowe jako źródła promieniowania synchrotronowego.

1. generacja – 1964 r. Akceleratory elektronów lub pozytonów (antyelektronów), wykorzystywane przede wszystkim jako zderzacze (np. synchrotron elektronowy w DESY o energii 7,4 GeV). **Produkcja promieniowania synchrotronowego jest efektem ubocznym pracy akceleratora.**



Synchrotrony i lasery na swobodnych elektronach (FEL)

Rozszerzona mapa światowych ośrodków • pierścienie magazynujące oraz FEL od podczerwieni do promieniowania X • październik 2026

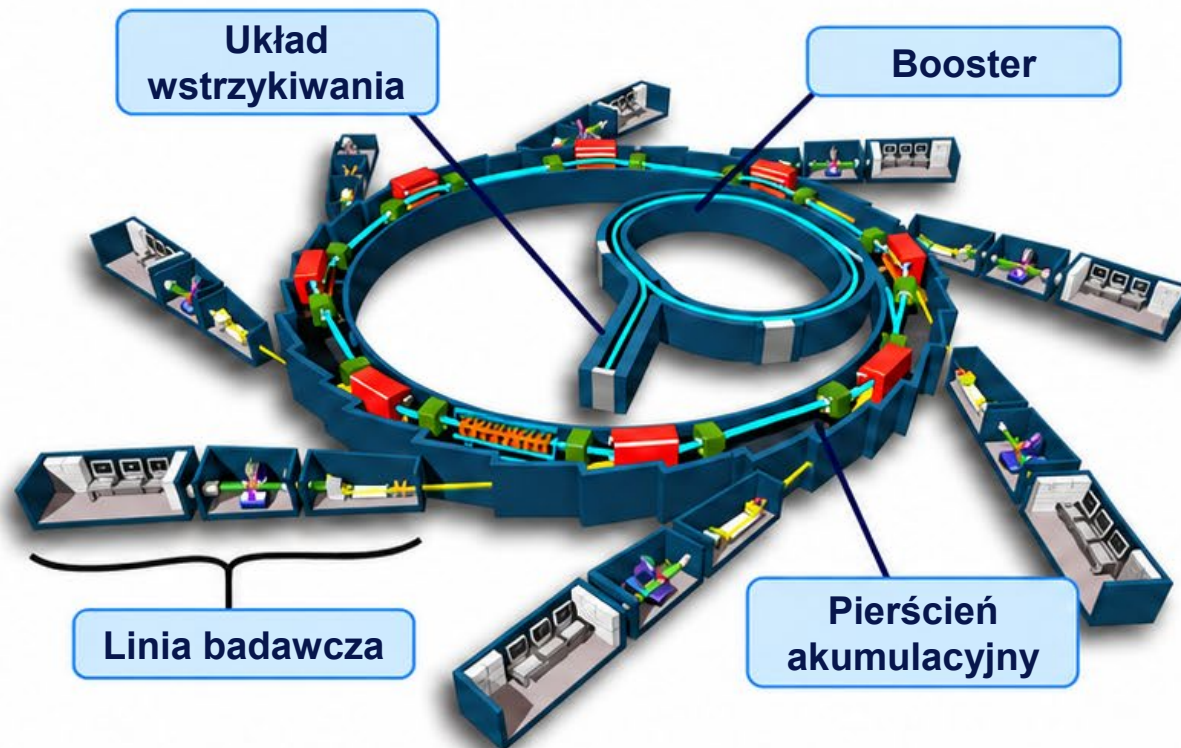


Wspólne lokalizacje grupowano. Obwódka wyróżnia SOLARIS. FEL oznaczono osobno — klasyfikacja generacji dotyczy tu pierścieni magazynujących.

Mapa przeglądowa, nie pełny rejestr wszystkich urządzeń. Status projektu nie oznacza dostępności czasu pomiarowego w danym dniu.

Źródła: IAEA, Lightsources.org, FELs of Europe i strony operatorów. Podkłady: Natural Earth. Położenia na poziomie miasta/kampusu.

Układ wstrzykiwania wiązki



1. Źródło elektronów i liniak

- Działo termoemisyjne wytwarza elektrony.
- Układ RF formuje z nich paczki.
- Liniak przyspiesza wiązkę do ok. 100 MeV.
- Możliwa jest pojedyncza paczka lub ciąg paczek.

2. Booster – synchrotron przyspieszający

- Zwiększa energię wiązki do poziomu GeV.
- Pola magnesów i RF zmieniają się synchronicznie.
- Parametry wiązki decydują o skuteczności wstrzykiwania.

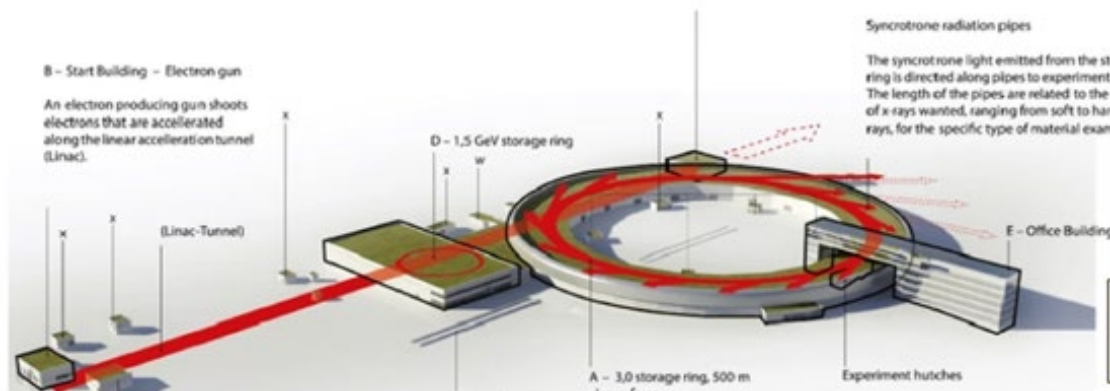
3. Linia transferowa

- Transportuje wiązkę do pierścienia akumulacyjnego.
- Magnesy dopasowują tor i rozmiar wiązki.
- Diagnostyka i kolimatory kontrolują jej jakość.

Od źródła elektronów do pierścienia, w którym powstaje promieniowanie synchrotronowe.

Wstrzykiwanie wiązki z liniaka

MAX IV • Lund, Szwecja



Liniak

Pierścienie: 1,5 i 3 GeV

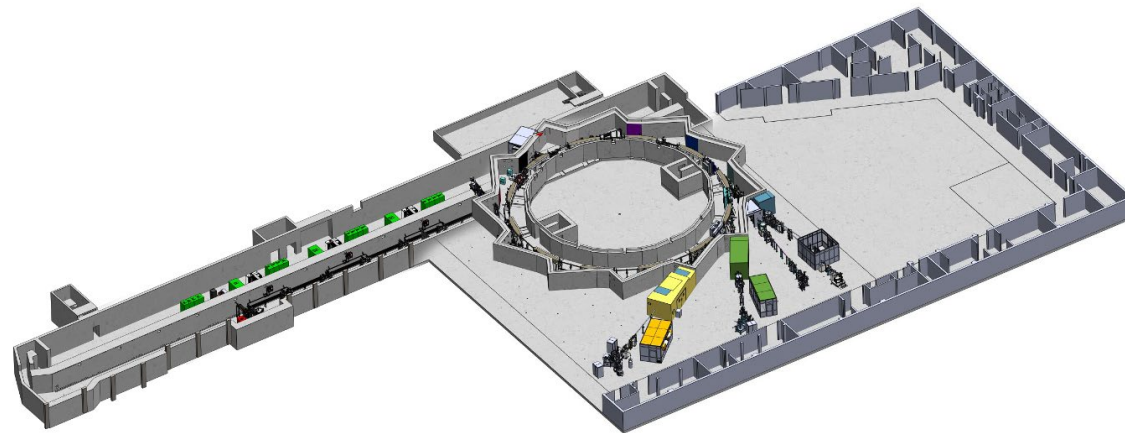
Wstrzykiwanie przy pełnej energii

Liniak osiąga energię do 3 GeV.

Zasila oba pierścienie bez boostera.

Top-up uzupełnia prąd podczas pracy.

SOLARIS • Kraków, Polska



Liniak

Pierścień: 1,5 GeV

Obecnie: wzrost energii w pierścieniu

Wstrzykiwanie przy ok. 0,54 GeV.

Następnie wzrost energii do 1,5 GeV.

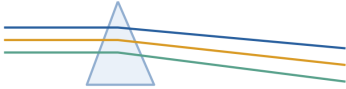
Plan: liniak 1,5 GeV i praca top-up.

Liniak o pełnej energii umożliwia top-up i stabilizację prądu w pierścieniu.

Magnesy sterują wiązką elektronów

Każdy typ magnesu pełni inną rolę w utrzymaniu wiązki na właściwym torze.

Dipole



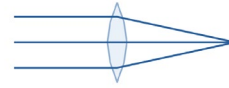
Zakrzywiają tor



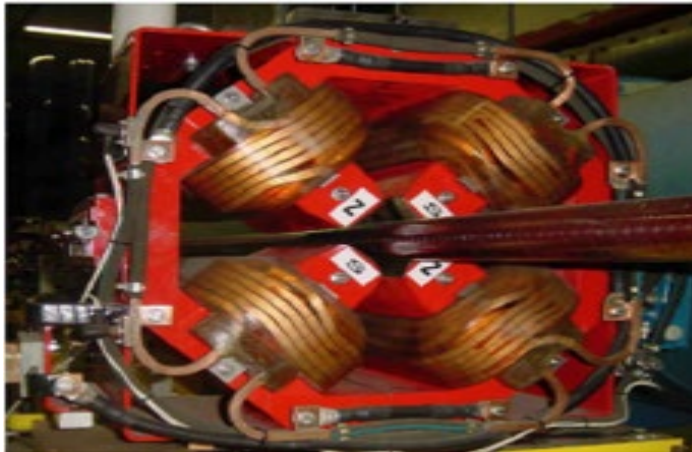
Kierują elektrony po zakrzywionym torze pierścienia.

Podczas zakręcania elektrony emitują promieniowanie synchrotronowe.

Kwadrupole



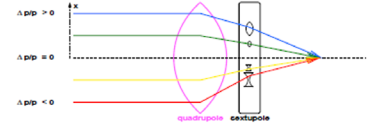
Ogniskują wiązkę



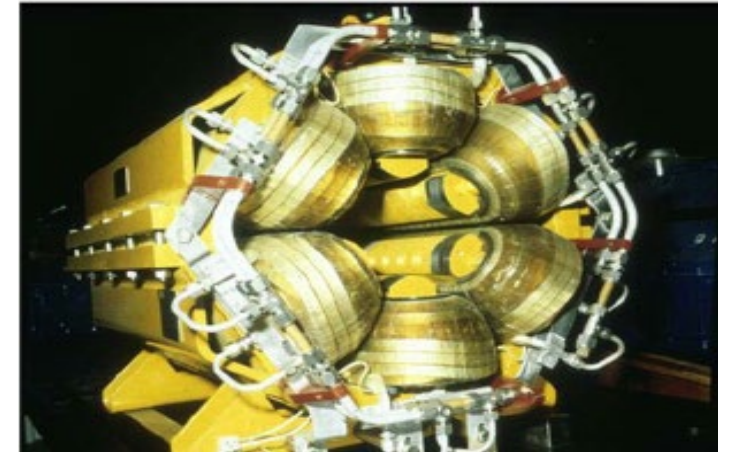
Działają jak soczewki i pomagają utrzymać mały rozmiar wiązki.

Skupiają w jednej płaszczyźnie, a rozpraszają w drugiej. Pracują w odpowiednio dobranych układach.

Sekstupole



Korygują ogniskowanie

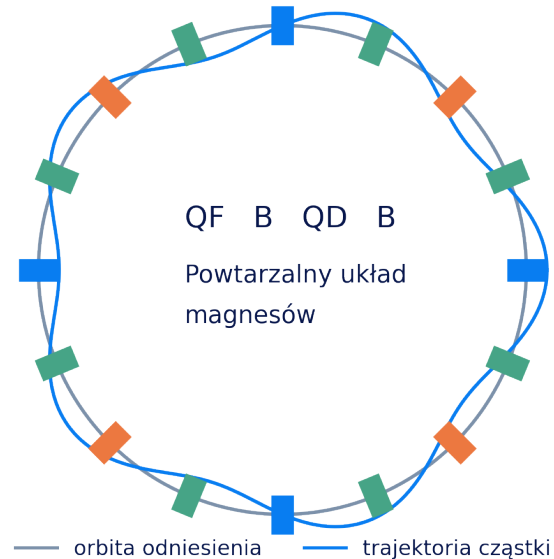


Elektrony o różnych energiach reagują inaczej na magnesy.

Sekstupole wyrównują różnice w ogniskowaniu wynikające z rozrzutu energii.

Ogniskowanie wiązki w pierścieniu

Układ magnesów synchrotronu



B: dipol zakrzywia orbitę.
QF / QD: kwadrupole ogniskują wiązkę.
Schemat poglądowy, amplituda powiększona.

Kwadrupole i równanie ruchu

Kwadrupol działa jak soczewka:
skupia w x i rozprasza w y lub odwrotnie.
Układ QF–QD utrzymuje wiązkę w x i y.

$$u''(s) + K_u(s) u(s) = 0$$

Równanie Hilla, $u = x$ lub y

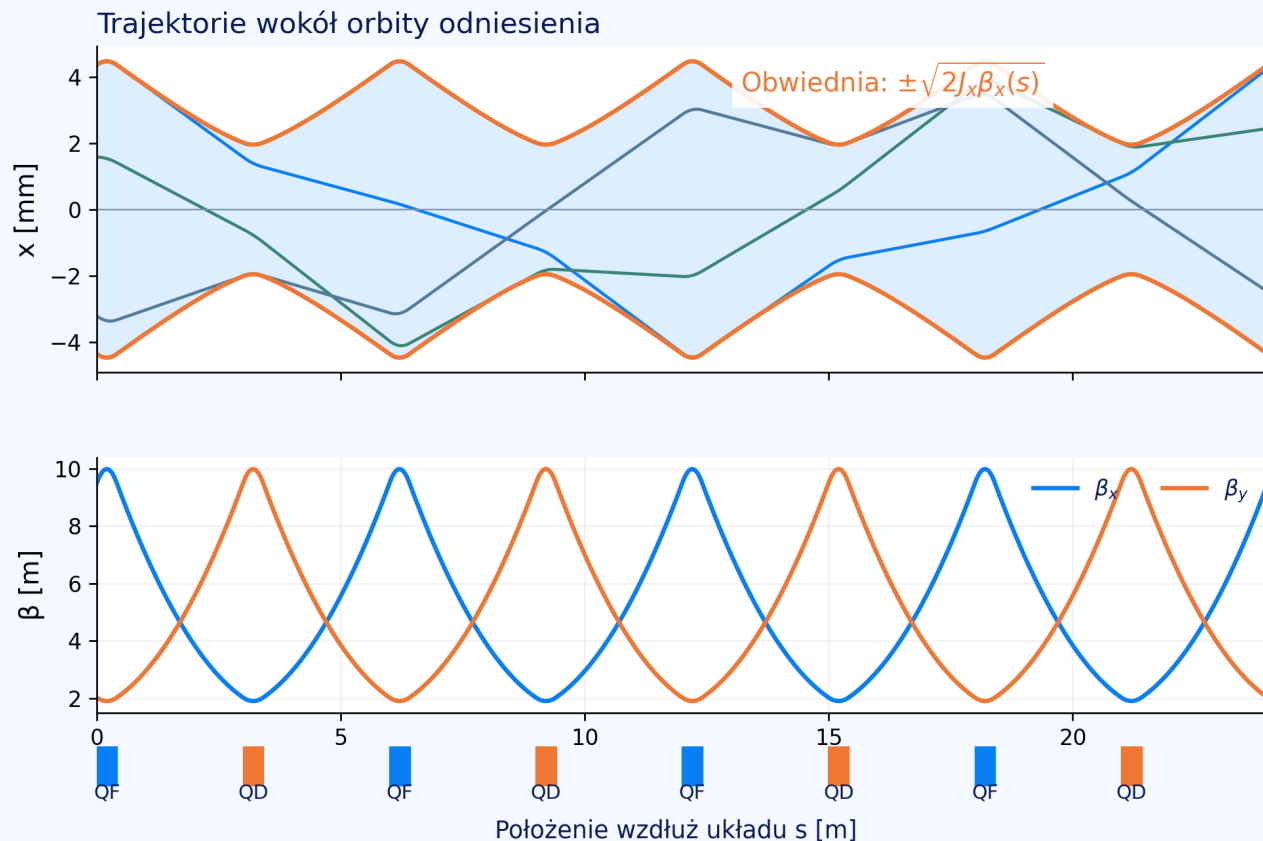
s : droga wzdłuż orbity
 u : odchylenie od orbity odniesienia
 $K_u(s)$: siła ogniskowania układu magnesów

Prądy kwadrupoli zmieniają optykę pierścienia i wartości tune.

Naprzemienne ogniskowanie zapewnia stabilny ruch w obu płaszczyznach.

Oscylacje betatronowe: funkcja β i tune

Optyka okresowej komórki FODO



Amplituda i faza ruchu

$$u(s) = \sqrt{2J_u \beta_u(s)} \cos[\psi_u(s) + \phi_u]$$

$$A_u(s) = \sqrt{2J_u \beta_u(s)}$$

$u = x$ lub y ; J_u — działanie cząstki
 $\beta_u(s)$ — funkcja betatronowa [m]
 $\psi_u(s)$ — faza; ϕ_u — faza początkowa

Tune: oscylacje na jeden obieg

$$Q_u = \frac{\Delta\psi_u}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \oint \frac{ds}{\beta_u(s)}$$

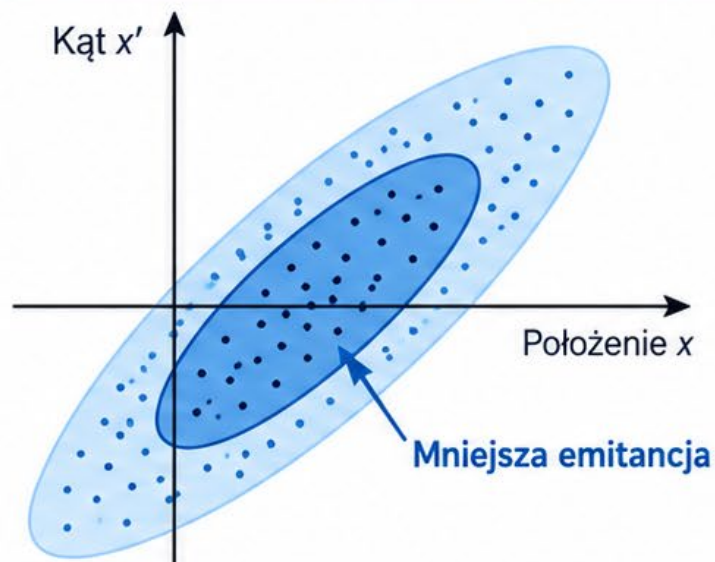
Przykład: $Q_x = 2,25 \rightarrow 2\frac{1}{4}$ oscylacji/obieg.
Dobór Q_x i Q_y pozwala unikać rezonansów.

Obliczenia dla modelu FODO, nie dla SOLARIS.

$\beta(s)$ określa lokalną amplitudę; Q — liczbę oscylacji na jeden obieg.

Emitancja wiązki elektronowej

1 Przestrzeń fazowa

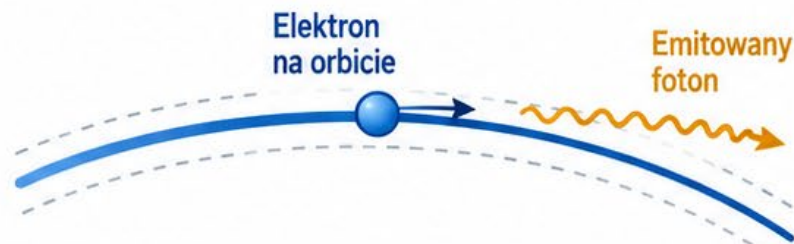


$$\varepsilon_x = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x x' \rangle^2}$$

$$\sigma_x^2 = \beta_x \varepsilon_x + (D_x \sigma_\delta)^2$$

Rozmiar zależy od emitancji, optyki i dyspersji.

2 Równowaga w pierścieniu



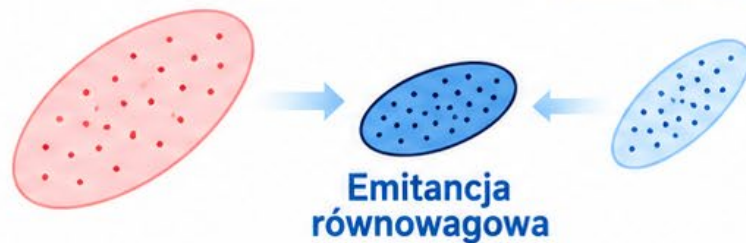
Emisja fotonów wzbudza oscylacje.
Tłumienie radiacyjne je ogranicza.

Wzbudzenie kwantowe

zwiększa
obszar fazowy

Tłumienie radiacyjne

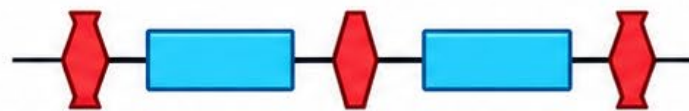
zmniejsza
obszar fazowy



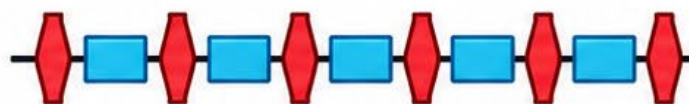
$$\varepsilon_x = C_q \gamma^2 \frac{I_5}{J_x I_2}$$

3 Zmniejszanie emitancji

DBA: dwa dipole



MBA: wiele dipoli



Dipol



Kwadrupol

$$\varepsilon_0 \propto \frac{F \cdot E^2}{N_d^3}$$

N_d : liczba dipoli

F: czynnik zależny od optyki

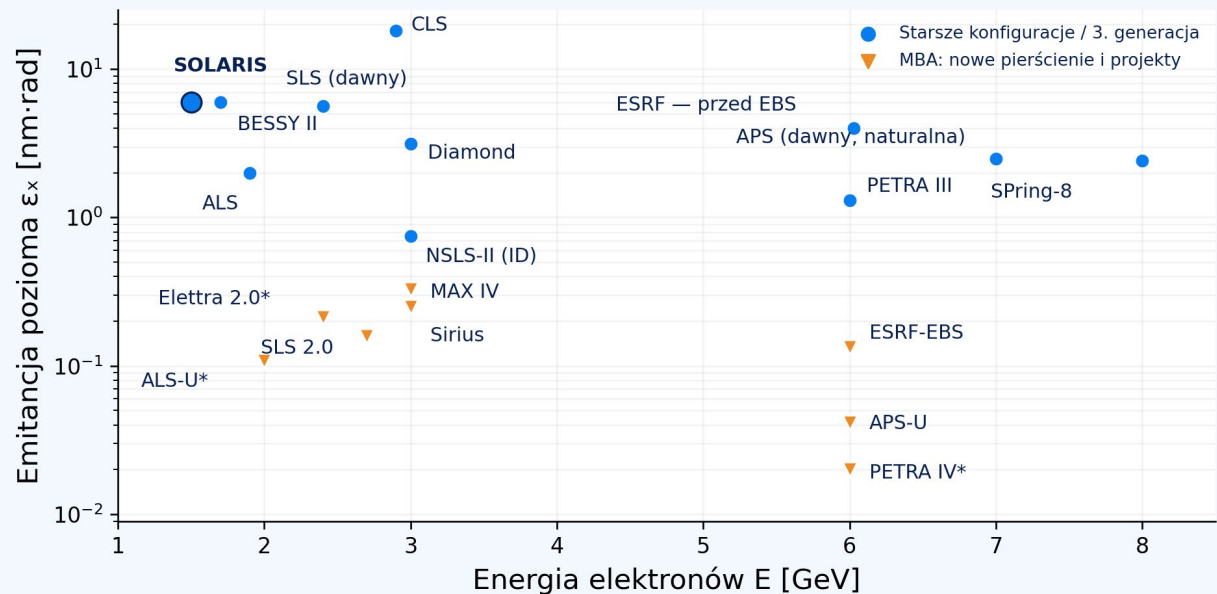
Dla porównywalnej optyki komórek.

Mniejsza emitancja pozwala uzyskać mniejszą plamkę i większą jasność.

Emitancja geometryczna RMS:
[m · rad]

Emitancja na świecie: od nm·rad do pm·rad

Energia, liczba dipoli i struktura magnetyczna wyznaczają możliwości pierścienia



Parametry nominalne / projektowe; * projekty, „dawny” — stara konfiguracja.
NSLS-II: wszystkie ID; SLS 2.0: 158 pm·rad (135 przy zamkniętych ID).

Mniejszy kąt ugięcia → mniejsza emitancja

$$\epsilon_{x,0} \approx F \frac{C_q \gamma^2}{J_x} \theta^3$$
$$\theta = \frac{2\pi}{N_d} \implies \epsilon_{x,0} \propto \frac{E^2}{N_d^3}$$

N_d — liczba dipoli (jednakowe kąty ugięcia)
 F — współczynnik zależny od optyki
 $\gamma = E/(m_e c^2)$; J_x — podział tłumienia
 $C_q \approx 3,83 \times 10^{-13} \text{ m}$

A co z obwodem C ?

$$N_d \propto C \implies \epsilon_{x,0} \propto \frac{E^2}{C^3}$$

Tylko dla podobnych komórek i stałych wymiarów magnesów. Sam większy obwód nie gwarantuje niższej emitancji.

2× więcej dipoli → około 8× mniejsza emitancja przy tej samej energii i podobnej optyce

Weryfikacja: 13.10.2026. Źródła: strony PSI, SOLARIS, ALS, CLS, Diamond, BNL, DESY, MAX IV, LNLS, ESRF, APS, Elettra; publikacje PRAB / JSR.

MAX IV • Szwecja | 328 pm·rad • 3 GeV



Sirius • Brazylia | 251 pm·rad • 3 GeV



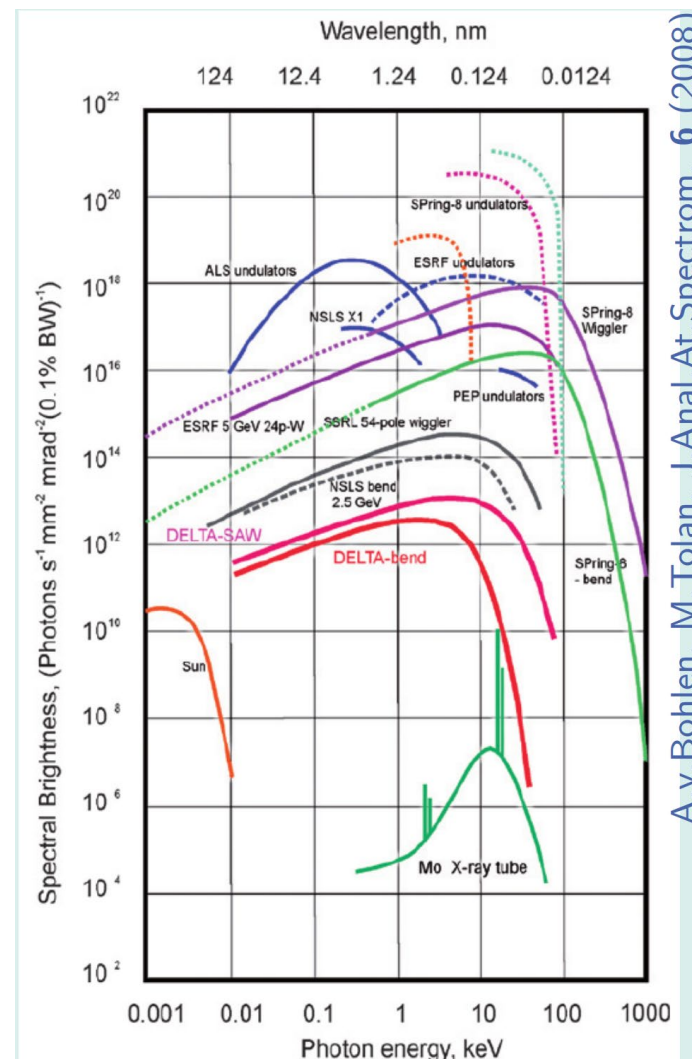
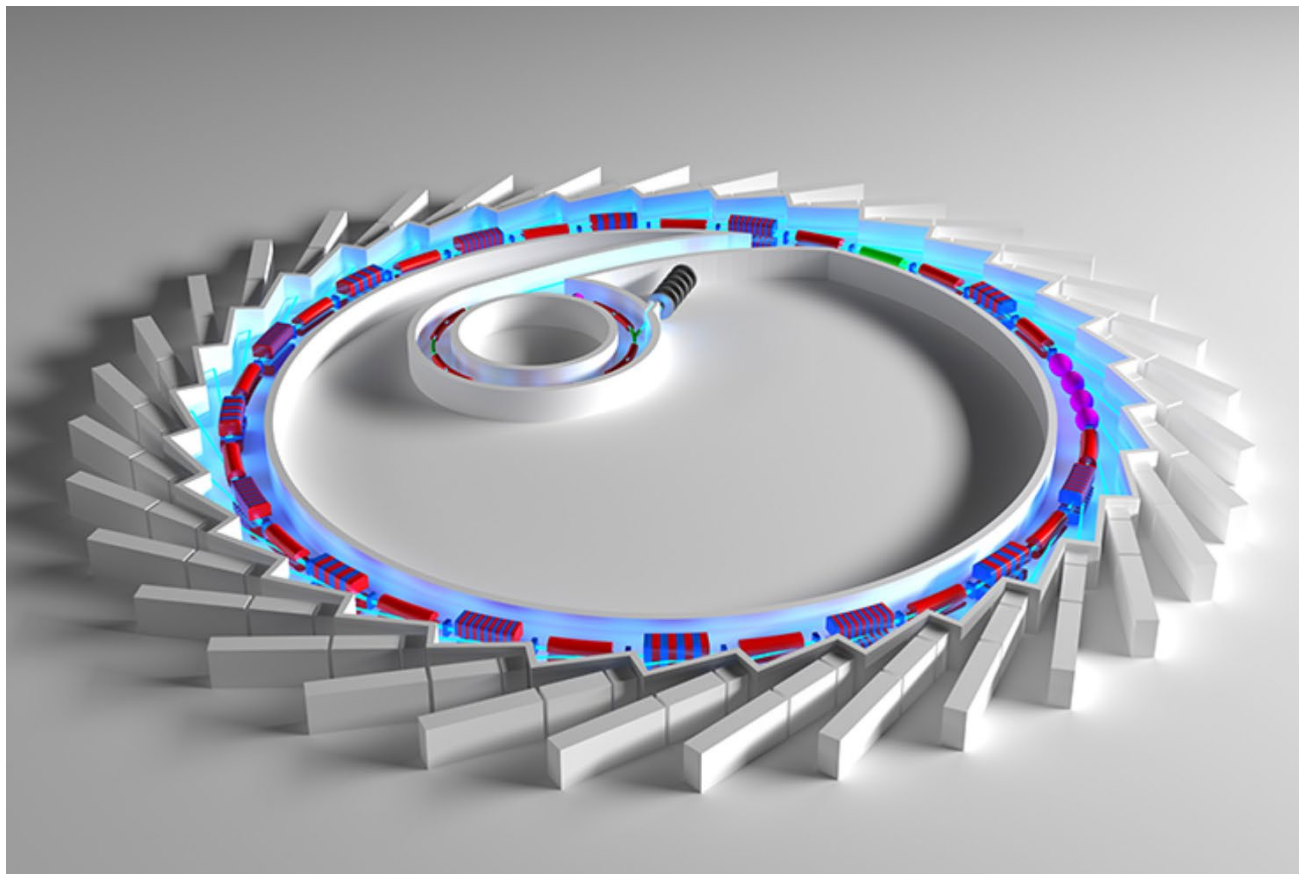
ESRF-EBS • Francja | 133 pm·rad • 6 GeV



Zdjęcia: MAX IV — via Sweden Innovation (LinkedIn); Sirius — Physics World / CNPEM; komórka magnetyczna ESRF-EBS — ESRF.

Do czego nam potrzebne magnesy zakrzywiające i undulatory?

Generowanie wysokiej jasności promieniowania synchrotronowego



A.v. Bohlen, M. Tolan, J. Anal. At. Spectrom. 6 (2008)

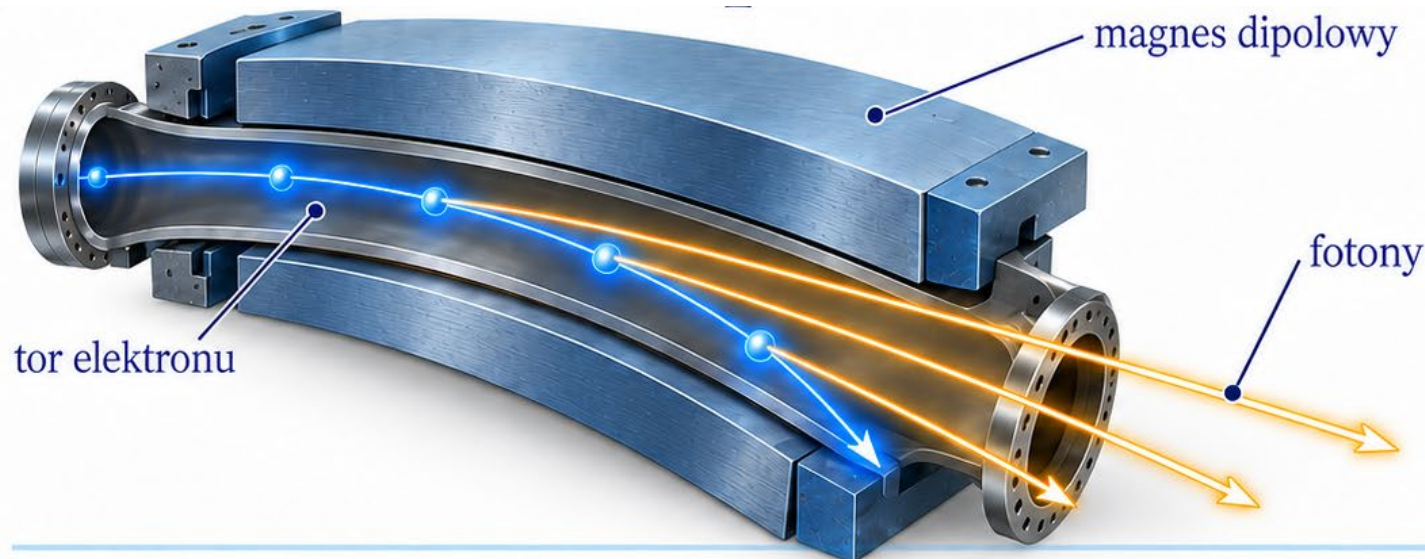
Magnesy dipolowe oraz urządzenia wstawkowe, takie jak undulatory i wiggler, są kluczowymi elementami akceleratorów. Wytwarzają wysokoenergetyczne promieniowanie synchrotronowe, wykorzystywane w wielu dziedzinach nauki.

Czym jest promieniowanie synchrotronowe?

Jak powstaje?

Elektron emituje promieniowanie elektromagnetyczne, gdy pole magnetyczne zakrzywia jego tor.

Zmiana kierunku prędkości oznacza przyspieszenie.



Podstawowe właściwości



Szerokie widmo



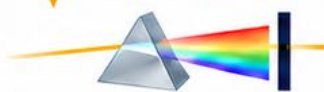
Duży strumień



Kierunkowość



Polaryzacja



Wybór energii

Od podczerwieni i światła widzialnego do UV i promieniowania X.

Duża liczba fotonów umożliwia szybkie i czułe pomiary.

Poziomo: wachlarz emisji. Pionowo: kąt rzędu $1/\gamma$.

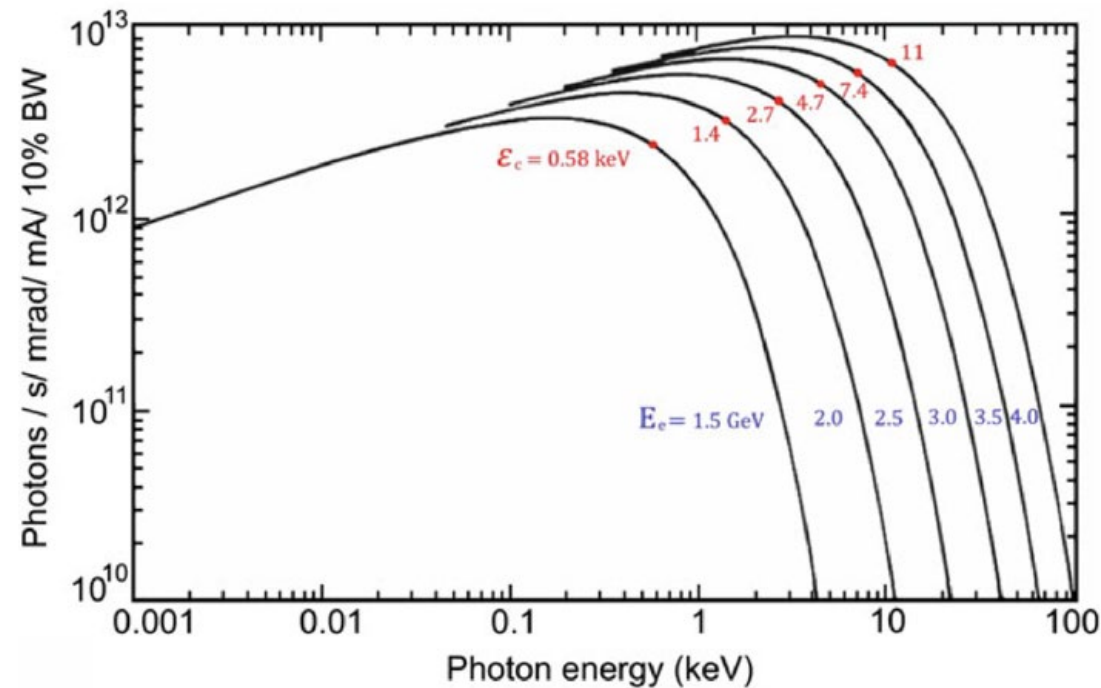
Liniowa w płaszczyźnie orbity, eliptyczna poza nią.

Monochromator wybiera pasmo z szerokiego widma dipola.

$$\gamma = \frac{E_{\text{całk}}}{m_e c^2} = 1 + \frac{E_{\text{kin}}}{m_e c^2}$$

Dla 1,5 GeV: $1/\gamma \approx 0,34$ mrad

Promieniowanie synchrotronowe z dipola



Ośrodek	E [GeV]	I [A]	ρ [m]	P _{tot} [kW]	dP/dθ _x [W/mrad]	(dP/dΩ) ₀ [W/mrad ²]
SOLARIS	1,5	0,5	3,819	58,6	9,3	18,0
DIAMOND	3	0,3	7,15	300,6	47,9	184,3
ESRF	6	0,2	25	917,2	146,0	1124,7

$$\text{strumień} = \frac{\text{ilość fotonów}}{\text{sekunda} \cdot 0.1\% BW}$$

Energia krytyczna

$$\varepsilon_c = \hbar \omega_c = \frac{3 \hbar c \gamma^3}{4 \pi \rho}$$

50% mocy poniżej ε_c
50% powyżej ε_c

Moc i kątowna gęstość mocy

$$P_{tot} = 88.46 \frac{E^4 I}{\rho} \quad U_{0,electron} [keV] = 88.46 \frac{E [GeV]^4}{\rho [m]}$$

[kW]

$$\frac{dP}{d\theta_x} = 14.08 \frac{E^4 I}{\rho} \quad \left. \frac{dP}{d\Omega} \right|_{\psi=0} = 18.08 \frac{E^5 I}{\rho}$$

[W/mrad] [W/mrad²]

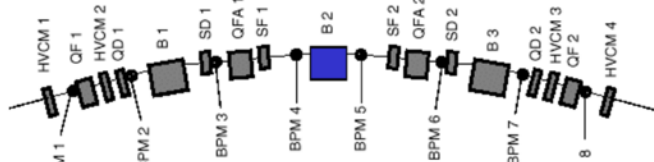
Superbend w ALS: dipol o silniejszym polu

Dipol rezystywny: 1,3 T, kąt ugięcia 10°

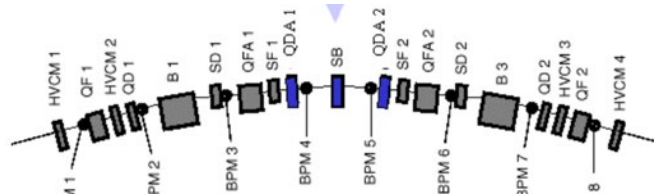
Zastąpiony dipolem nadprzewodzącym: 5 T, kąt ugięcia 10°

Układ magnesów

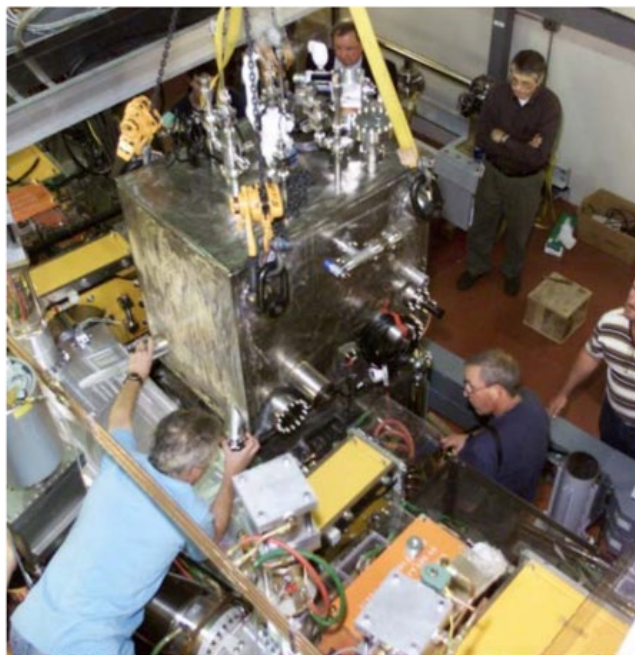
Przed modernizacją



Po modernizacji

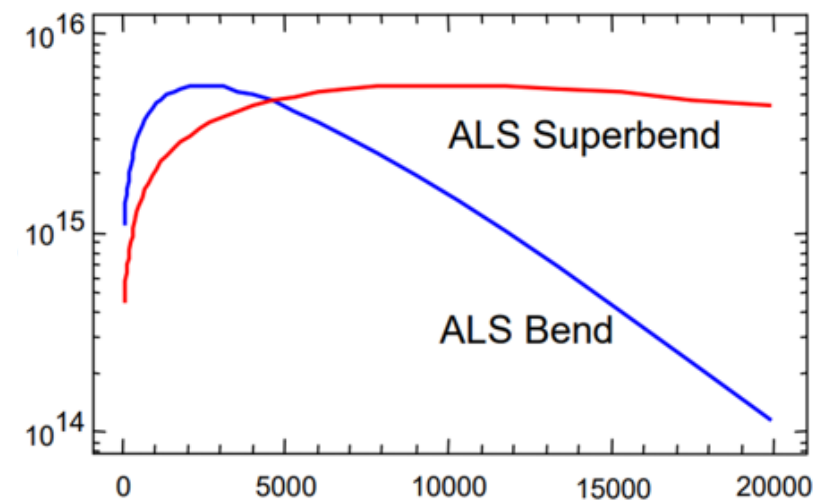


Instalacja magnesu



Jasność spektralna

fotony/(s·mm²·mrad²·0,1% BW)



Energia fotonu [eV]

ALS Bend: dipol rezystywny

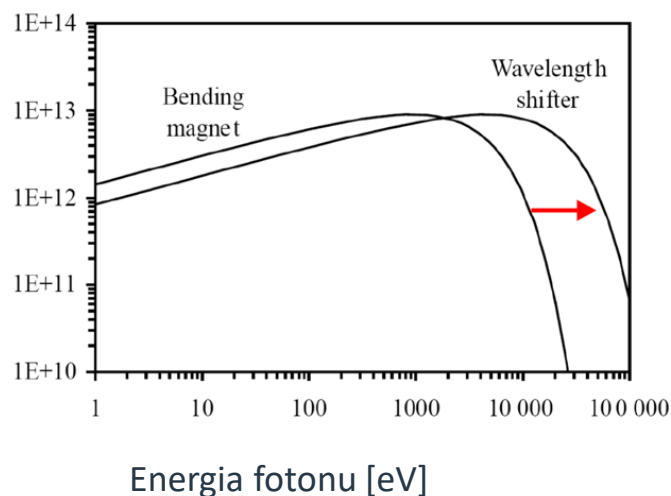
Źródło: D. Robin, „Superbend Upgrade at the Advanced Light Source”, PAC 2003

Przesuwacz widma i zasada działania wigglera

Przesuwacz widma (wavelength shifter) to urządzenie wstawiane w odcinek prosty. Silne pole środkowego magnesu zwiększa energię krytyczną promieniowania.

Przesunięcie widma

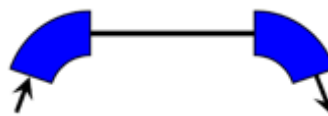
Ten sam kształt widma, wyższe energie fotonów



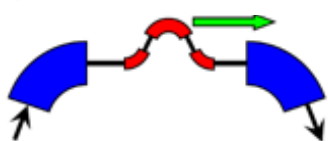
Zamknięta trajektoria

Trzy magnesy tworzą szykanę

Przed



Po

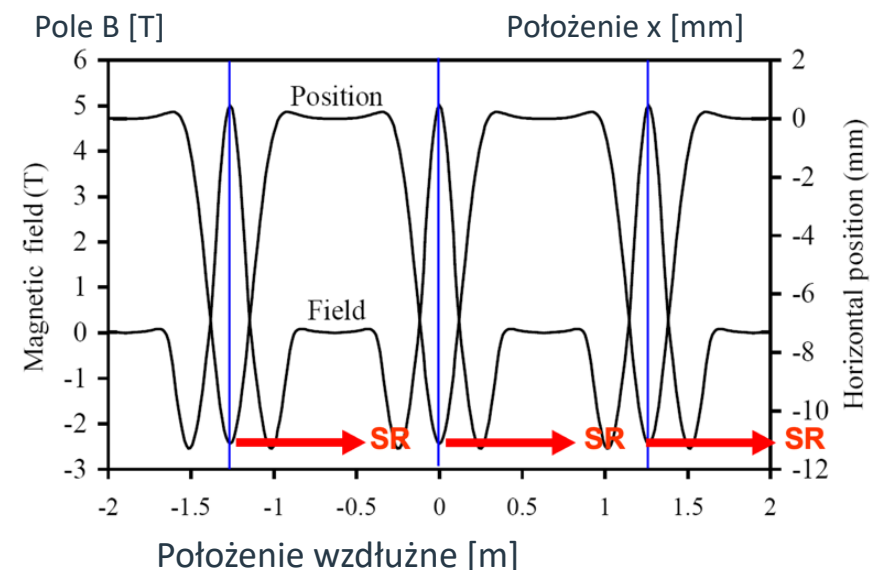


Kąt i położenie na wyjściu jak na wejściu

$$x'(-LID/2) = x'(LID/2)$$

$$x(-LID/2) = x(LID/2)$$

Kilka niezależnych źródeł



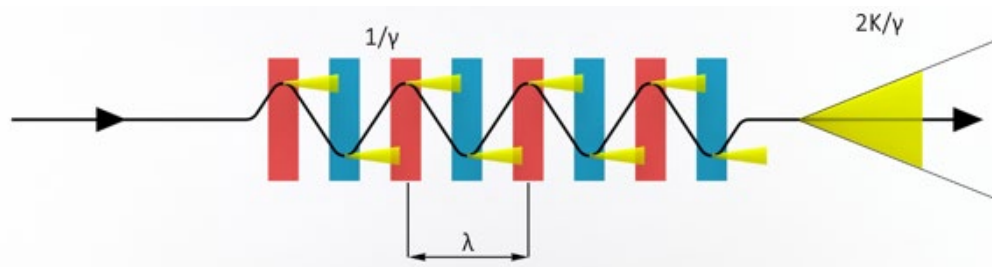
3 układy: strumień $\approx$ 3 razy większy
Zasada wigglera wielobiegunowego

Źródło: J. A. Clarke, materiały o urządzeniach wstawianych (IDs)

Wiggler wielobiegunowy (MPW)

Wiggler to ciąg dipoli o naprzemiennym kierunku pola magnetycznego.
W każdym okresie występują dwa punkty emisji promieniowania.

Trajektoria, kąty emisji i moc



Dla dużego K: poziomo $\pm K/\gamma$
Pionowo: około $\pm 1/\gamma$

Moc w dowolnym układzie magnesów [W]

$$P_{tot} = 1265.5 E^2 I \int_0^L B(s)^2 ds$$

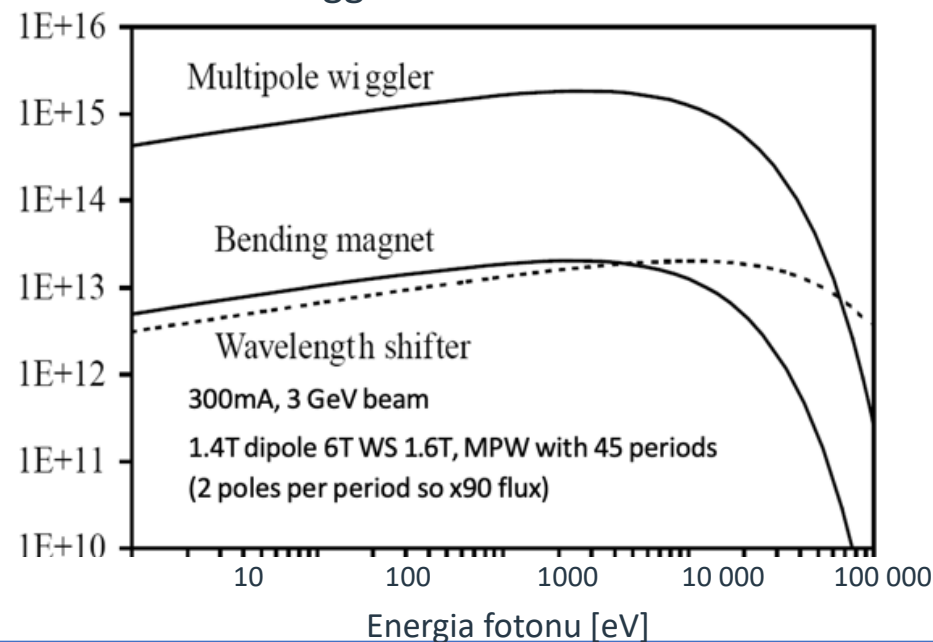
Dla pola sinusoidalnego o amplitudzie B_0 :

$$P_{tot} = 632.8 E^2 B_0^2 L I$$

E [GeV], I [A], B [T], L [m]. Źródło: J. A. Clarke, IDs

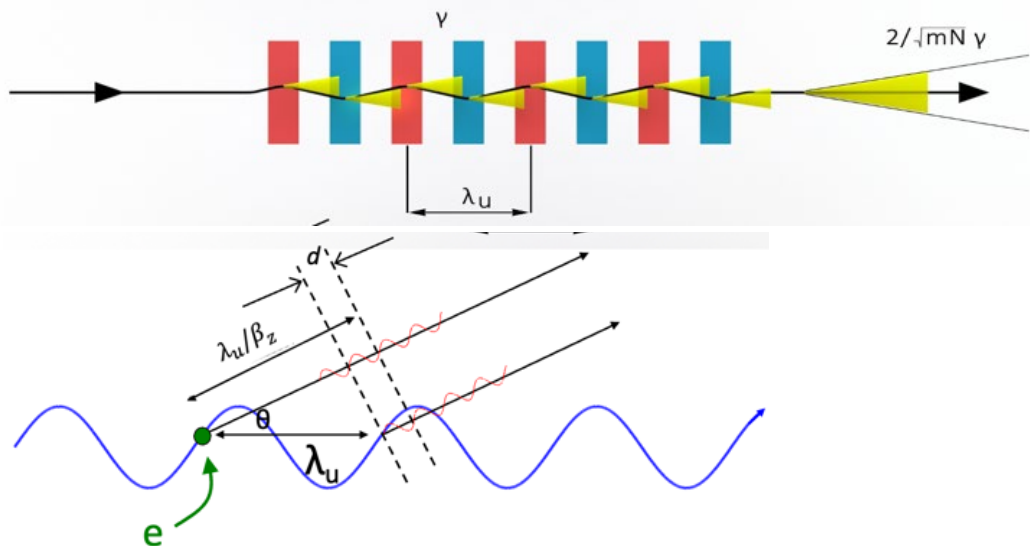
Strumień i energia krytyczna

Silniejsze pole zwiększa energię krytyczną.
Strumień promieniowania wzrasta o czynnik równy dwukrotnej liczbie okresów wigglera.



Undulator: interferencja i strojenie widma

Interferencja promieniowania



Czas przejścia elektronu: $t = \lambda_u / (c\beta_z)$

Droga fali w tym czasie: $ct = \lambda_u / \beta_z$

Różnica dróg: $d = \frac{\lambda_u}{\beta_z} - \lambda_u \cos\theta$

Interferencja konstruktywna: $d = n\lambda$

Maksymalny kąt odchylenia: $\theta_{\max} \approx K/\gamma$

β_z i θ określają różnicę dróg fal. Warunek $d = n\lambda$ prowadzi do równania undulatora.

Równanie undulatora

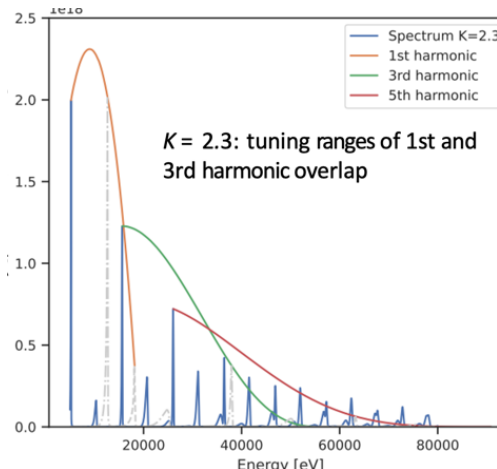
$$\lambda_n = \frac{\lambda_u}{2n\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \theta^2 \gamma^2 \right)$$

$$K = \frac{\lambda_u e B_0}{2\pi m c} = 93.36 B_0 \lambda_u$$

K: parametr odchylenia

$K \lesssim 1$: reżim undulatorowy, $K \gg 1$: wigglerowy

Strojenie widma i harmoniczne



Dla $K = 2,3$ zakresy strojenia 1. i 3. harmonicznej nakładają się.

n: numer harmonicznej

λ_u : okres magnetyczny

γ : czynnik Lorentza

θ : kąt obserwacji

$\beta_z = v_z/c$

Jasność spektralna – jakość światła synchrotronowego

Dużo fotonów • małe źródło • mała rozbieżność • wąskie pasmo energii

Niższa jasność

Duże źródło, szeroka wiązka



Wyższa jasność

Małe źródło, mała rozbieżność



Porównanie przy tym samym strumieniu fotonów

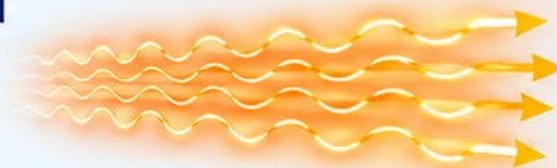
1 Mniejsza emitancja

Bardziej zwarta wiązka elektronów.



2 Większy prąd

Więcej fotonów na sekundę.



3 Co zyskujemy?

Badanie mniejszych próbek i szybsze pomiary.



Jasność spektralna:

$$B = \frac{F}{4\pi^2 \Sigma_x \Sigma_{x'} \Sigma_y \Sigma_{y'}} \propto \frac{I}{\epsilon_x \epsilon_y}$$

F : strumień fotonów w paśmie 0,1%
 Σ : rozmiary i rozbieżności źródła

I : prąd wiązki elektronów
Przy dominującym wkładzie emiscji elektronów

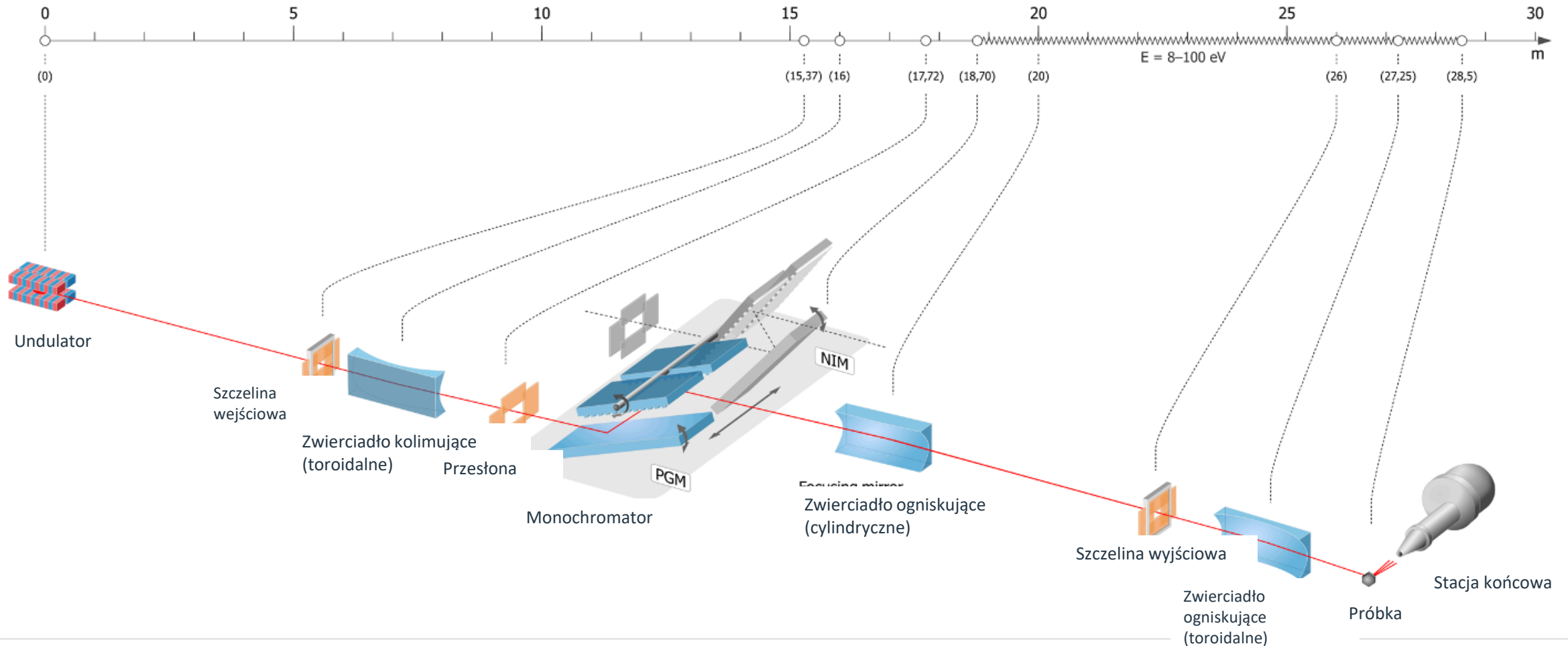
Granica dyfrakcyjna:

$$\epsilon_r = \frac{\lambda}{4\pi}$$

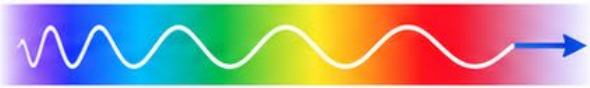
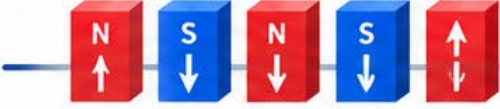
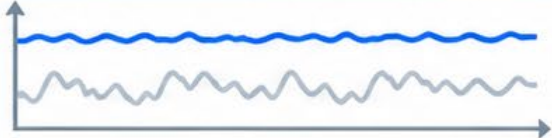
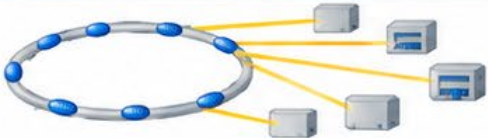
Dla $\lambda = 1 \text{ \AA}$: $\epsilon_r \approx 8 \text{ pm} \cdot \text{rad}$

Linia badawcza: od źródła do próbki

Optyka wybiera energię fotonów i skupia promieniowanie. Każdy element wprowadza straty.



Wyzwania projektowe synchrotronów

Czego potrzebuje eksperyment?		Co musi zapewnić akcelerator?	
	Zakres energii fotonów		Energia elektronów, pole magnetyczne, parametry undulatora
	Strumień fotonów		Energia elektronów i prąd wiązki
	Jasność promieniowania		Energia, prąd i mała emitancja
	Polaryzacja		Orientacja pola magnetycznego
	Struktura czasowa		Częstotliwość RF i układ paczek
	Stabilność wiązki		Sprężenia zwrotne, czas życia wiązki i iniekcja
	Liczba dostępnych linii badawczych		Magnesy zakrzywiające i urządzenia wstawkowe

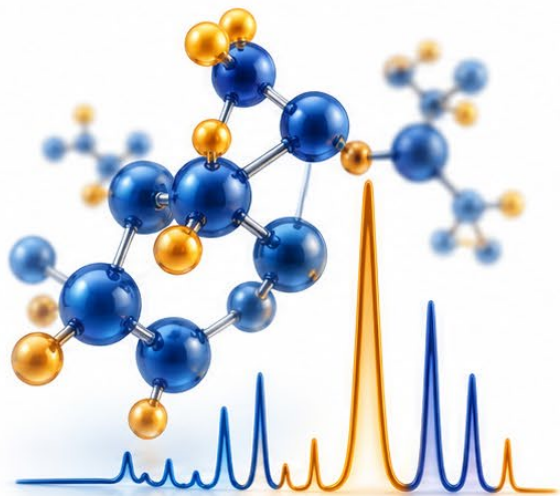
Parametry wiązki elektronów decydują o możliwościach eksperymentu

Do czego służy światło synchrotronowe?

Pozwala poznawać materiały od skali atomów po całe obiekty.

Skład próbki

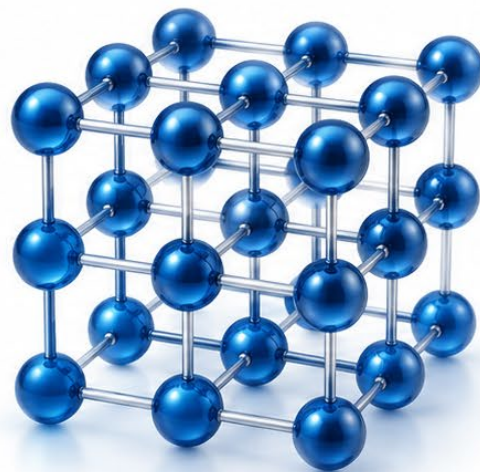
Spektroskopia



Rozpoznajemy pierwiastki i wiązania chemiczne.

Układ atomów

Dyfrakcja i rozpraszanie



Poznajemy strukturę kryształów i białek.

Wnętrze próbki

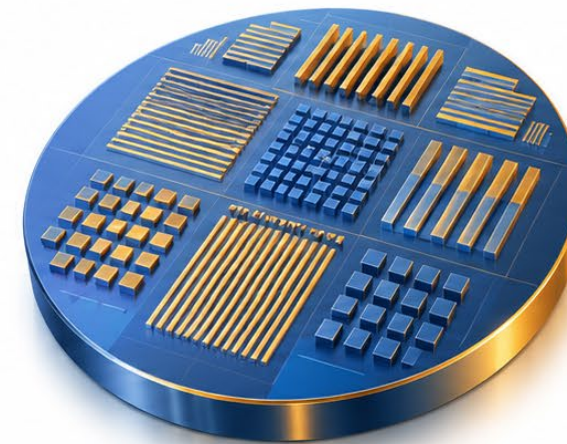
Obrazowanie i tomografia



Oglądamy wnętrze próbki bez rozcinania, także w 3D.

Mikrostruktury

Litografia rentgenowska



Tworzymy bardzo małe, precyzyjne elementy.



JAGIELLONIAN UNIVERSITY
IN KRAKÓW



SOLARIS
NATIONAL SYNCHROTRON
RADIATION CENTRE

Obrazowanie promieniowaniem X: od kości do tkanek miękkich

Promieniowanie synchrotronowe pozwala wykorzystać także kontrast fazowy

1895 • **kontrast absorpcyjny**

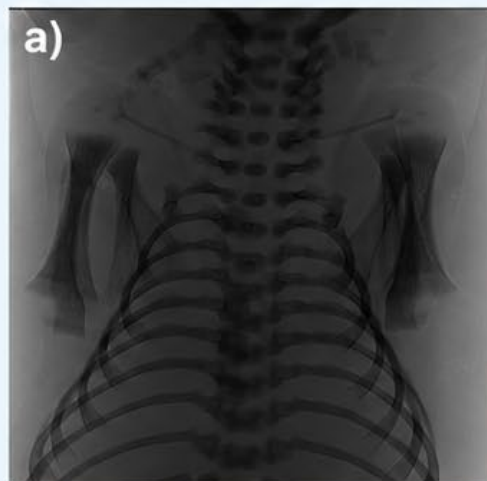


Historyczny obraz dłoni z pierścieniem

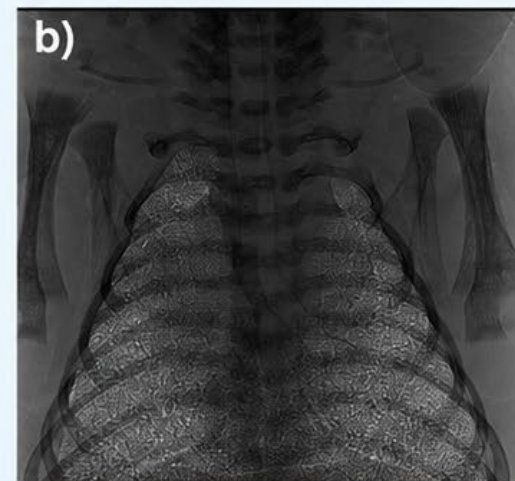
Różne materiały pochłaniają promieniowanie X w różnym stopniu.

Kości i metal są dobrze widoczne.

Synchrotron • kontrast fazowy



a) Słabo widoczne tkanki miękkie



b) Wyraźniejsza struktura i granice tkanek

Zmiana fazy i niewielkie załamanie promieniowania uwypatniają granice struktur.

Promieniowanie X



Dobrze skolimowana wiązka • koherencja przestrzenna • odpowiednia odległość od detektora

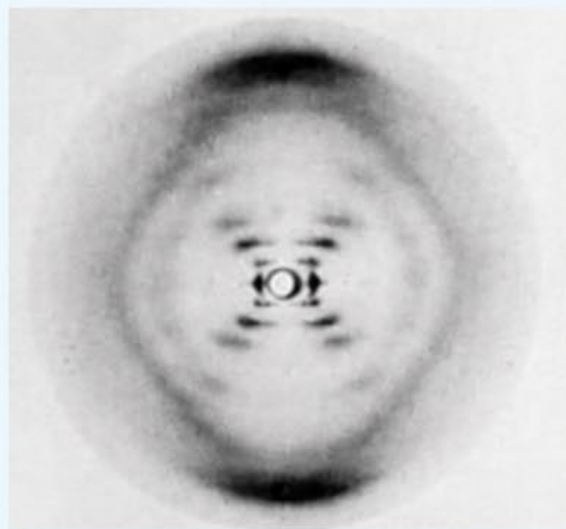


Kontrast absorpcyjny pokazuje różnice pochłaniania; **kontrast fazowy** pomaga zobaczyć delikatne struktury.

Od struktury DNA do białek w ruchu

Jak światło synchrotronowe zmieniło badania biologiczne

1952 • poznajemy strukturę DNA

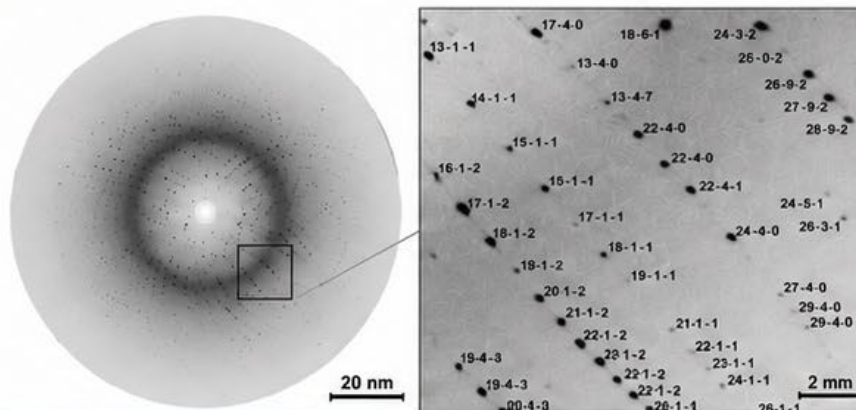


Fotografia 51 • DNA w formie B

Rosalind Franklin i Raymond Gosling
Lampa rentgenowska • ekspozycja: 62 godziny

Obraz dyfrakcyjny pomógł ustalić
helikalną strukturę DNA.

Synchrotron • obserwujemy zmiany w czasie



ESRF: mioglobina po fotodysocjacji CO

Rozdzielczość czasowa:
około 100 ps

Przykład: obraz z 32 impulsów X,
zebrany w 10 s; opóźnienie
wzbudzenie-sondowanie:
100 ps.

→ Nie tylko „jak wygląda cząsteczka?“, ale również „jak zmienia się podczas reakcji?”

Od dyfrakcji do struktury białka

Krystalografia rentgenowska: jak odtwarzamy budowę cząsteczek?

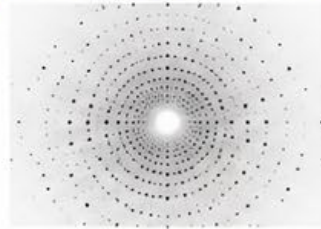


1 Krysztal białka

Promieniowanie
rentgenowskie
z synchrotronu

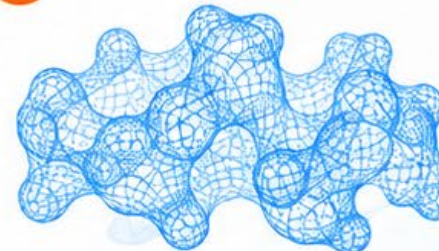


2 Obraz dyfrakcyjny

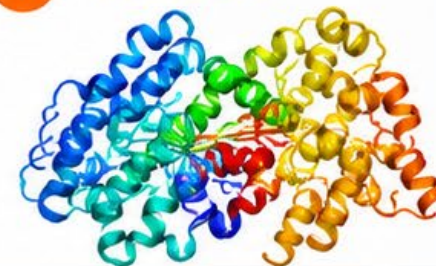


Schematyczny obraz

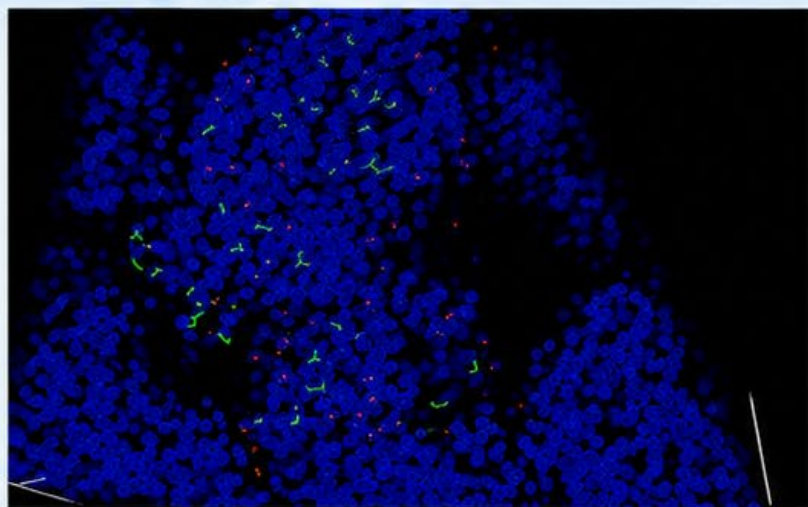
3 Gęstość elektronowa



4 Model 3D

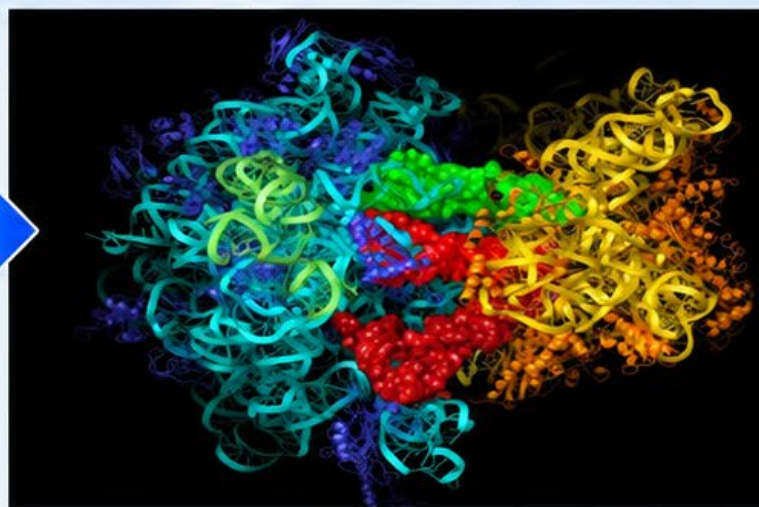


Mapa gęstości elektronowej



Pokazuje, gdzie znajdują się elektrony w kryształach.

Model przestrzenny białka



Model atomowy dopasowujemy do mapy i układamy.

Jak powstaje mapa gęstości?

Do rekonstrukcji potrzebne są **amplitudy** i **fazy fal**. Intensywności mierzymy; fazy wyznaczamy dodatkowymi metodami.



Struktura → zrozumienie funkcji

Znajomość budowy pomaga wyjaśnić, jak białko działa.



Miejsca wiązania → projektowanie leków

Struktura ujawnia kieszenie wiążące, co wspiera projektowanie inhibitorów.

Nie fotografujemy atomów bezpośrednio — odtwarzamy ich położenie z danych dyfrakcyjnych.

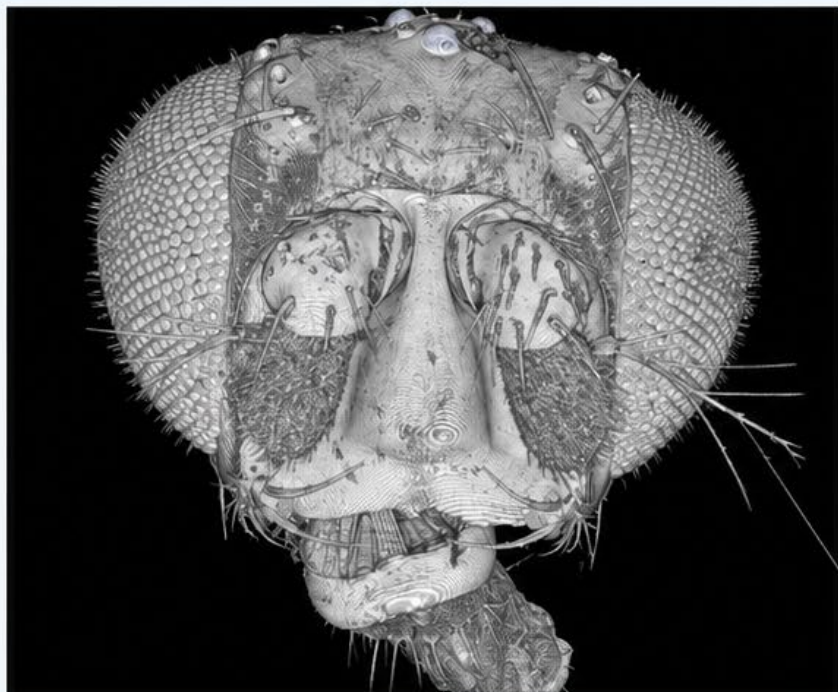
Krystalografia rentgenowska odegrała kluczową rolę w wielu odkryciach nagrodzonych Noblem.

Ilustracje z materiału źródłowego; schemat procesu jest poglądowy.

Tomografia promieniowaniem X: zaglądamy do wnętrza w 3D

Wiele projekcji rentgenowskich → rekonstrukcja przestrzenna próbki

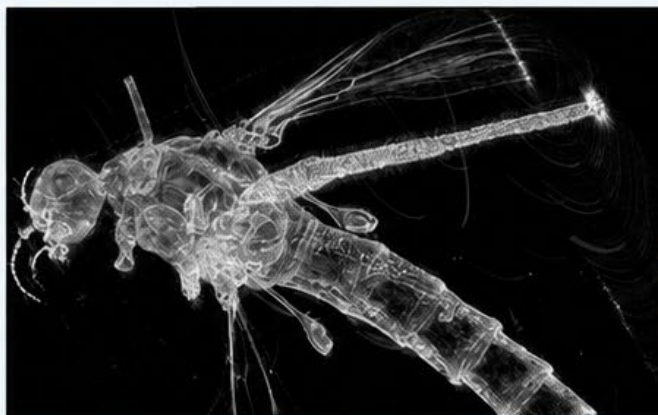
Biologia • struktury wewnętrzne



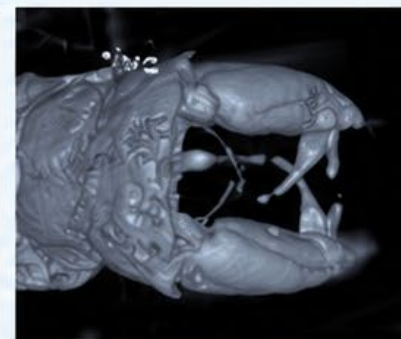
Rekonstrukcja 3D głowy muchy

A.-S. Chiang, Y. Hwu i współautorzy

Paleontologia • owad zamknięty w bursztynie



Koziulka w bursztynie bałtyckim • około 40 mln lat



Szczegóły budowy,
w tym narządy rozrodcze



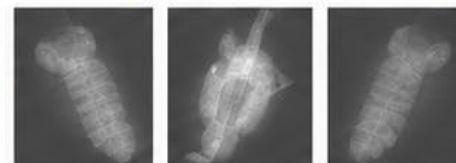
Linia POLYX • SOLARIS

Katarzyna Kopeć i współautorzy • Instytut Systematyki i Ewolucji Zwierząt PAN

1. Obrót próbki



2. Projekcje pod różnymi kątami



3. Rekonstrukcja 3D



Promieniowanie synchrotronowe umożliwia obrazowanie drobnych struktur wewnętrznych.



Poznajemy wnętrze próbki bez jej rozcinalania — od współczesnej biologii po skamieniałości.

Promieniowanie synchrotronowe w paleontologii

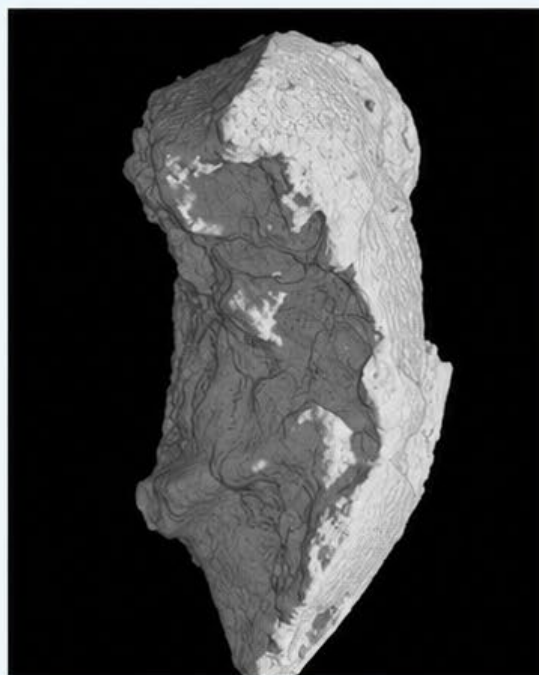
Jak zajrzeć do wnętrza skamieniałości bez jej rozcinania?

1. Skamieniałość



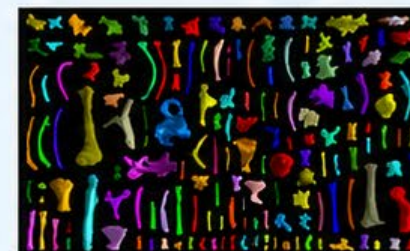
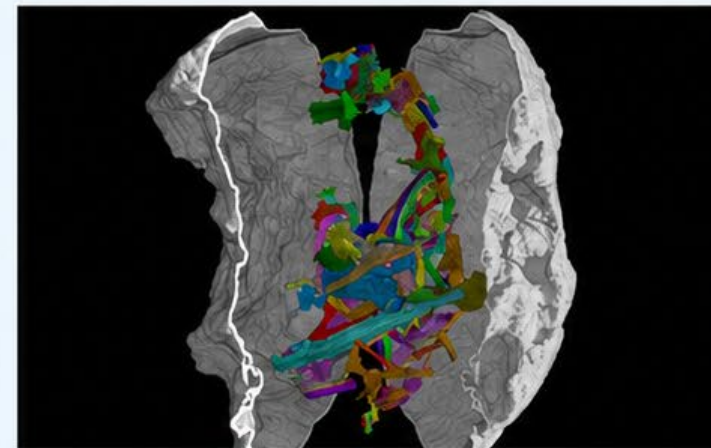
Skamieniałe jajo z Tajlandii
Okolo 100 mln lat

2. Mikrotomografia



Promieniowanie X ujawnia
struktury ukryte wewnątrz

3. Rekonstrukcja 3D



Cyfrowe wydzielenie kości
i analiza ich budowy



Archaeopteryx —
odrębny przykład
rekonstrukcji wyglądu



Wysoka rozdzielczość i obraz 3D — bez mechanicznego rozcinania okazu.

Synchrotron odkrywa tajemnice dzieł sztuki

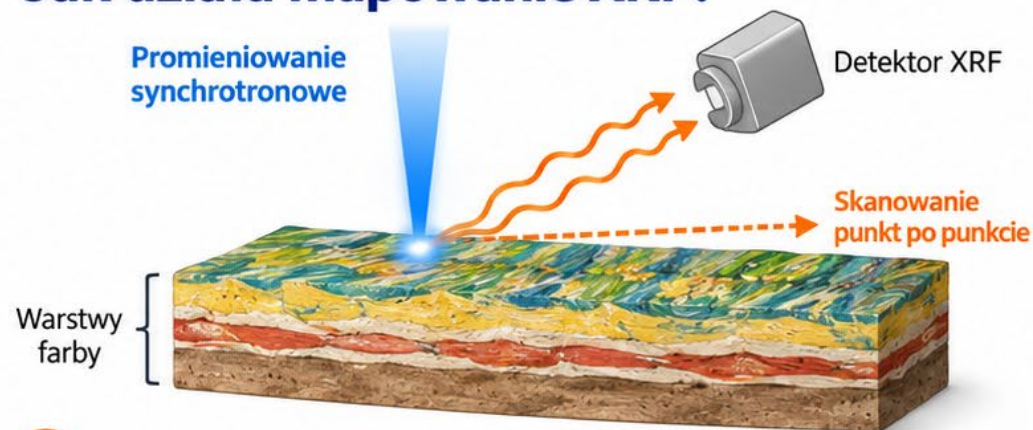
Fluorescencja rentgenowska (XRF): pierwistki ujawniają ukryte warstwy obrazu

Ukryty portret pod warstwą farby



Mapowanie XRF ujawniło zamalowany portret kobiety.

Jak działa mapowanie XRF?



- 1 Wiązka X wzbudza atomy w pigmentach.
- 2 Atomy emitują promieniowanie o charakterystycznych energiach.
- 3 Skanowanie tworzy mapy rozmieszczenia pierwiastków.

Przykładowe pierwiastki w pigmentach:

Hg

Sb

Pb

Mapy pierwiastków pomagają rozpoznać pigmenty i wcześniejsze kompozycje.

Badamy skład i historię obrazu bez usuwania warstw farby.

Synchrotron bada... czekoladę

O jakości decyduje nie tylko skład, lecz także struktura masła kakaowego

Dlaczego struktura ma znaczenie?



Połysk i gładka powierzchnia



Nalot tłuszczowy

To ilustracyjne przykłady, nie są to próbki z pomiarów.

Masło kakaowe może krystalizować w **różnych formach**.

Forma V jest pożądana w dobrze temperowanej czekoladzie.

Co mierzymy promieniowaniem synchrotronowym?



Dyfrakcja X → rozpoznanie form krystalicznych



Pomiary podczas ogrzewania i chłodzenia → przemiany struktury



Kontrola procesu → lepsze temperowanie i trwałość

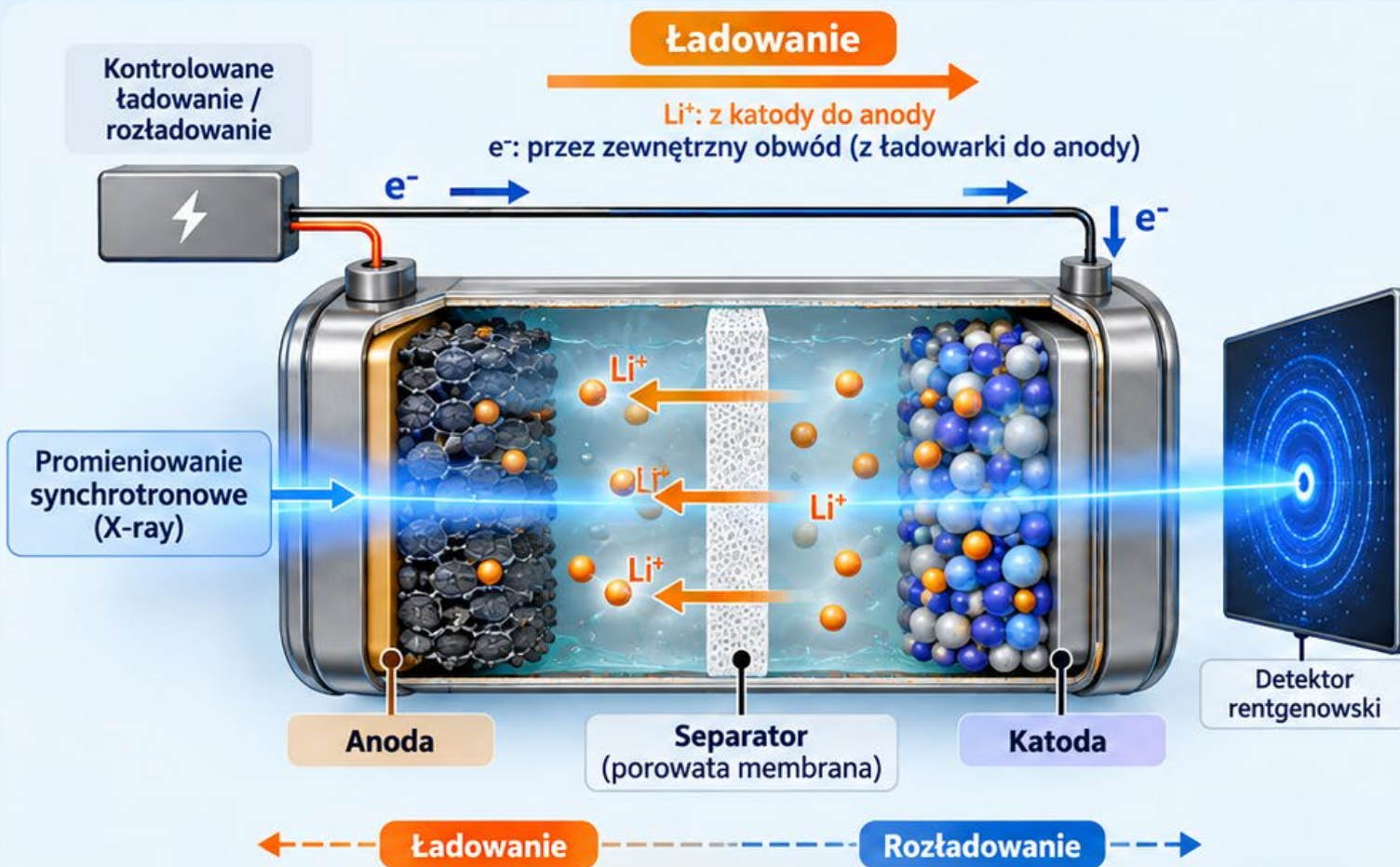
Przykład: ESRF — badania struktury masła kakaowego w formie V.

Struktura tłuszczu wpływa na połysk, „trzask”, topnienie i stabilność czekolady.

Synchrotron zagląda do pracującej baterii

Badania operando: obserwujemy materiał podczas ładowania i rozładowania.

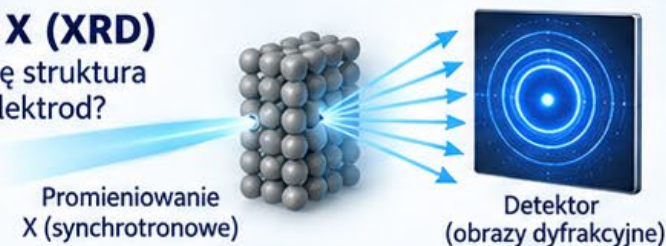
Co dzieje się wewnątrz ogniwa?



Trzy techniki — uzupełniające informacje

Dyfrakcja X (XRD)

Jak zmienia się struktura krystaliczna elektrod?



Spektroskopia absorpcyjna (XAS)

Jak zmienia się stan utlenienia i otoczenie atomów?



Tomografia rentgenowska

Gdzie powstają pęknięcia, pustki i niejednorodności?



Przykład: Diamond — badania operando elektrod i obrazowanie ogniw.

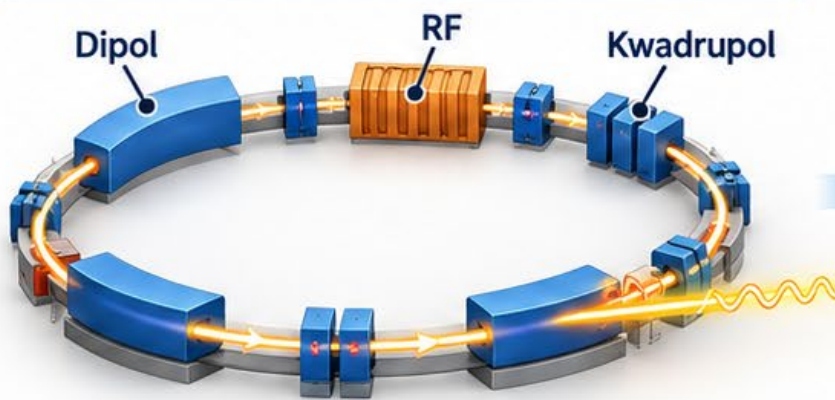
➔ **Poznajemy mechanizmy degradacji, aby projektować trwalsze i bezpieczniejsze baterie.**

Podsumowanie

Synchrotron to akcelerator kołowy, w którym zsynchronizowane pola sterują ruchem i energią cząstek naładowanych.

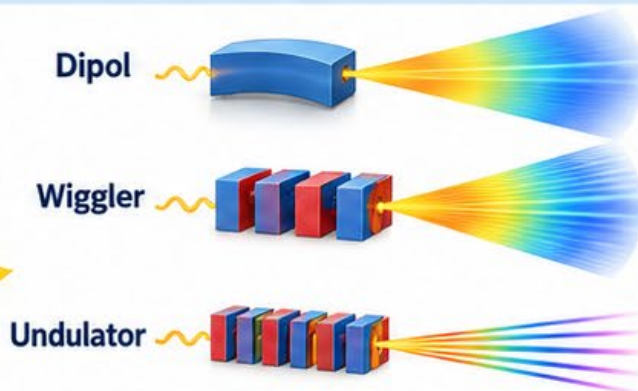
W synchrotronowych źródłach światła wykorzystujemy elektrony emitujące promieniowanie.

Kontrolujemy elektrony



Dipole zakrzywiają tor.
Kwadrupole ogniskują wiązkę. RF dostarcza energię.

Kształtujemy promieniowanie



Dipol — szerokie widmo
Wiggler — duży strumień
Undulator — wybrane harmoniczne

Badamy materię



Struktura, skład i dynamika

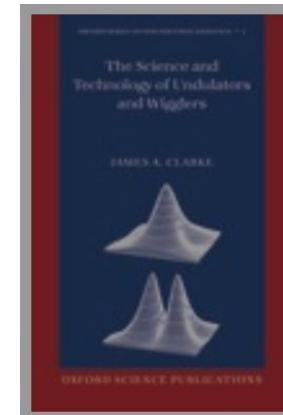
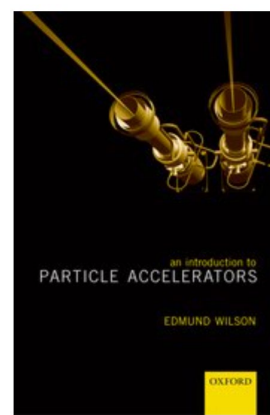
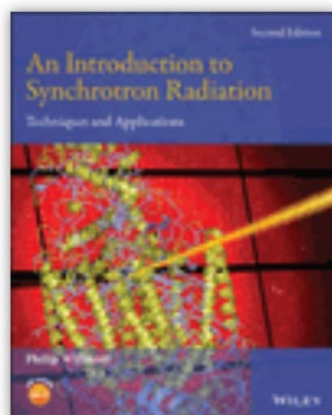
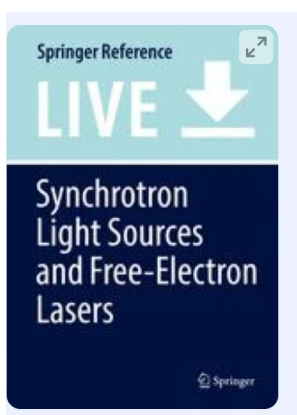
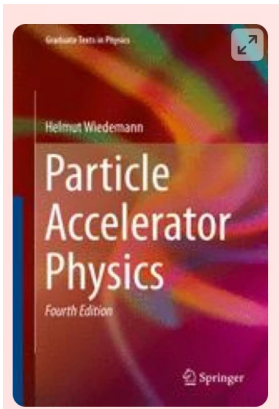
O możliwościach eksperymentu decydują: energia fotonów, strumień, jasność, polaryzacja i stabilność.

Emisja promieniowania oznacza także straty energii elektronów i obciążenia cieplne.

Jakość eksperymentu zależy od całego układu — od wiązki elektronowej po analizę danych.

Literatura uzupełniająca

1. H. Wiedemann, Particle Accelerator Physics, 4th ed., Springer, Heidelberg, Germany (2015).
2. Eberhard J. Jaeschke, Shaukat Khan, Jochen R. Schneider, Jerome B. Hastings, **Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers, 2nd edition, Springer**
3. Philip Willmott, , An Introduction to Synchrotron Radiation, 2nd edition, Willey
4. E. J. N. Wilson, An Introduction to Particle Accelerators, Oxford University Press, Oxford, UK (2001).
5. Attwood, Coherence, Brightness and Time Structure: from Synchrotrons to FEL
6. Antonella Balerna and Settimio Mobilio, **Introduction to Synchrotron Radiation**
7. J. A. Clarke: "The Science and Technology of Undulators and Wigglers" Oxford University Press, 2004
8. CERN Accelerator School cas.web.cern.ch



Dziękuję za uwagę 😊
www.synchrotron.uj.edu.pl



Research Facilities

Instruments

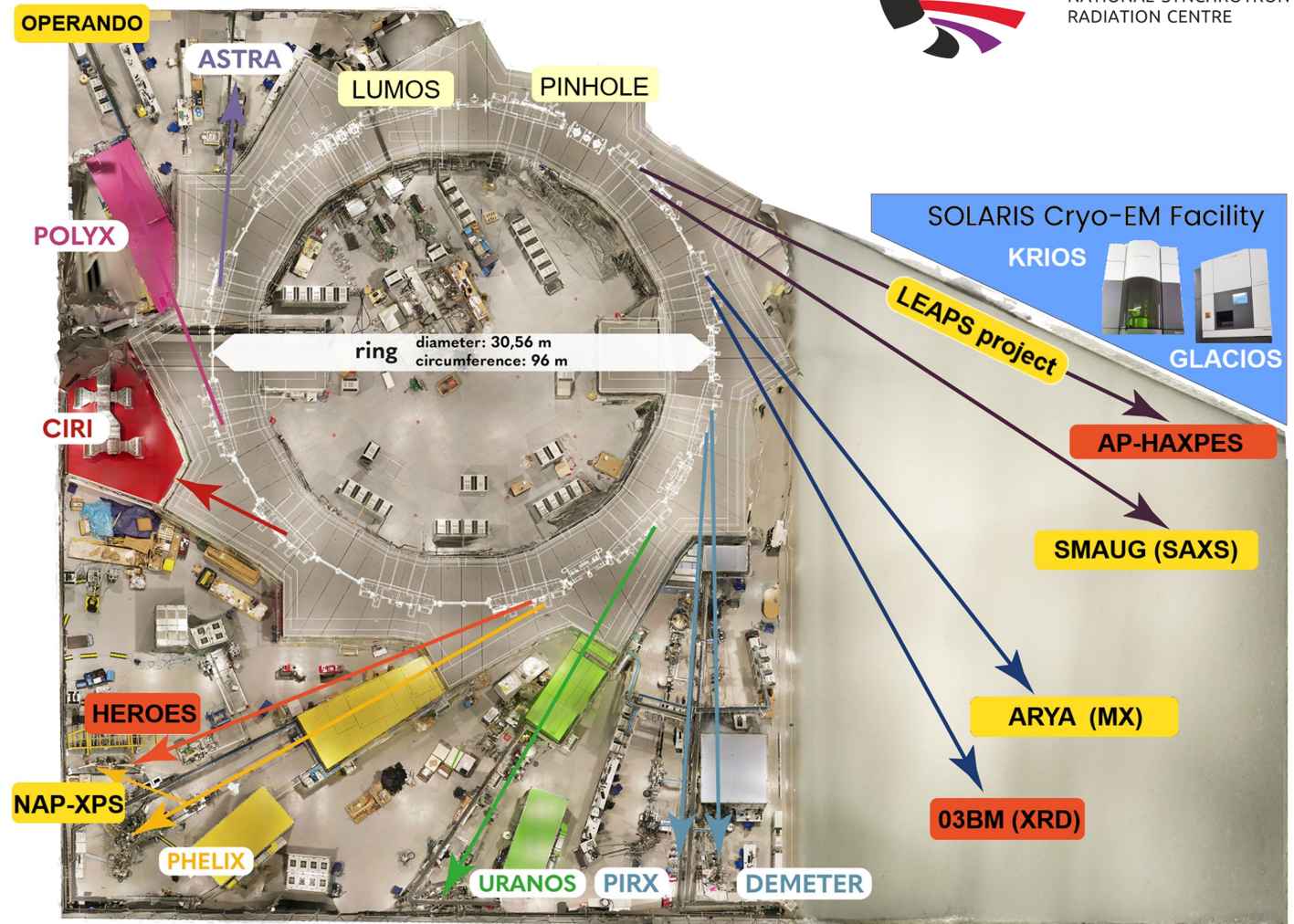
- IR microspectroscopy (3)
- VUV and soft X-ray spectroscopy (3)
- soft X-ray microscopy (2)
- hard X-ray spectroscopy (1)
- hard X-ray microscopy & tomography (1)
- transmission electron microscopes (2)

Operating

- Beamlines
- Cryo-EM Facility
- Diagnostic instruments

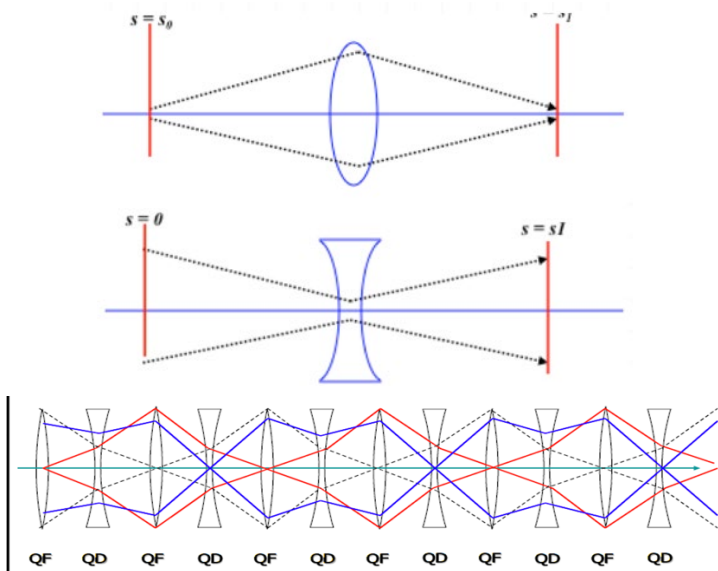
Development plans

- under construction
- awaiting for funding



Ogniskowanie, funkcja β i emitancja

Magnesy kształtują optykę

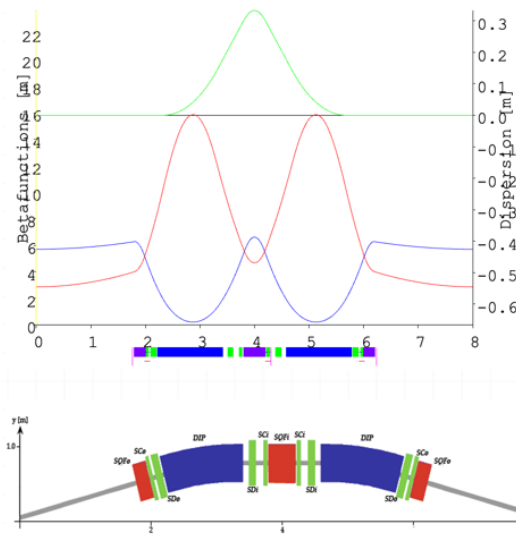


Kwadrupol skupia w jednej płaszczyźnie i rozprasza w drugiej.

Układ QF–QD zapewnia ogniskowanie w x i y przy odpowiednim doborze sił.

$$u'' + K_u(s)u = 0$$

$\beta(s)$ opisuje obwiednię

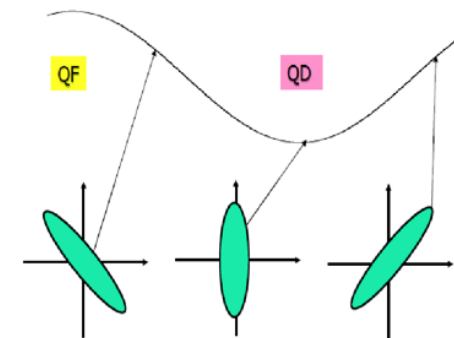


β_x i β_y wynikają z całego układu magnesów i zmieniają się wzdłuż s.

$$u(s) = \sqrt{[2J_u\beta_u(s)]} \cos(\psi_u + \varphi)$$

Większa β : większa amplituda dla tej samej akcji J_u cząstki.

ϵ opisuje zwartość wiązki



Elipsa (x, x') zmienia kształt. Jej pole $A = \pi\epsilon$ pozostaje stałe w idealnym transporcie liniowym.

$$\sigma_x(s) = \sqrt{[\epsilon_x\beta_x(s)]}$$

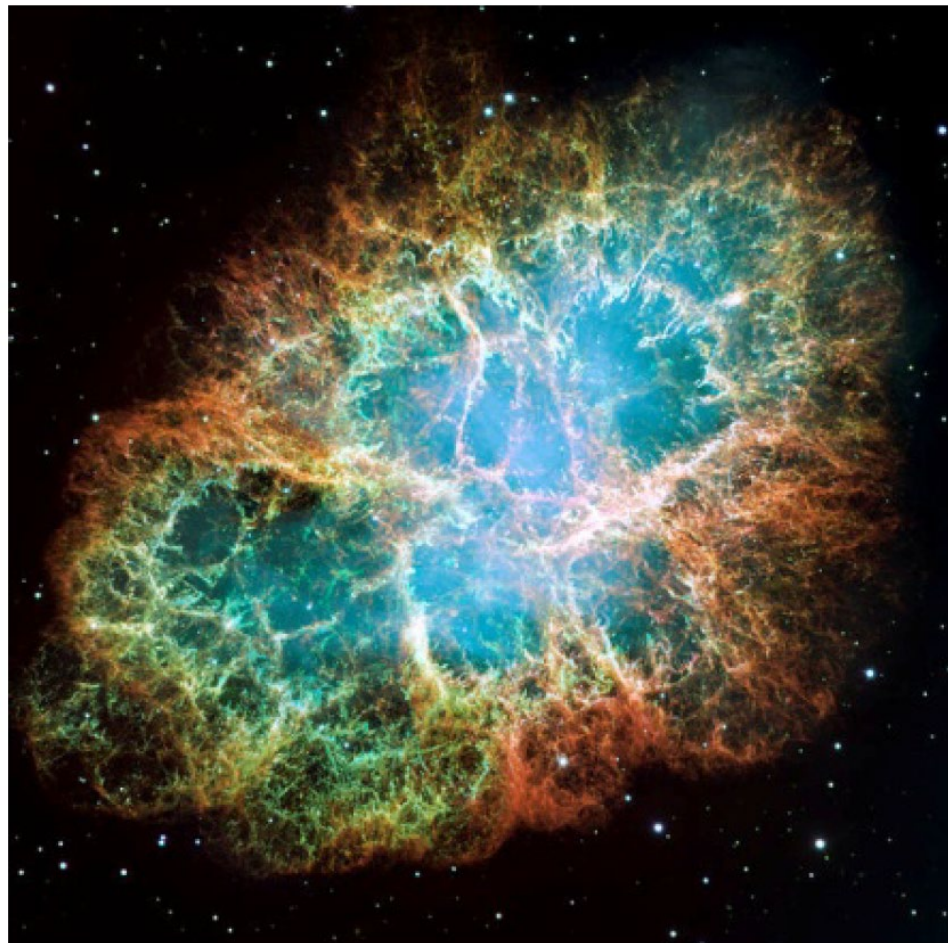
Bez wkładu dyspersji.

ϵ : emitancja geometryczna RMS

σ_x : rozmiar RMS wiązki

Kwadrupole zmieniają rozmiar wiązki przez $\beta(s)$. Samo ogniskowanie nie zmniejsza emitancji.

Pierwsze udokumentowana obserwacja promieniowania synchrotronowego



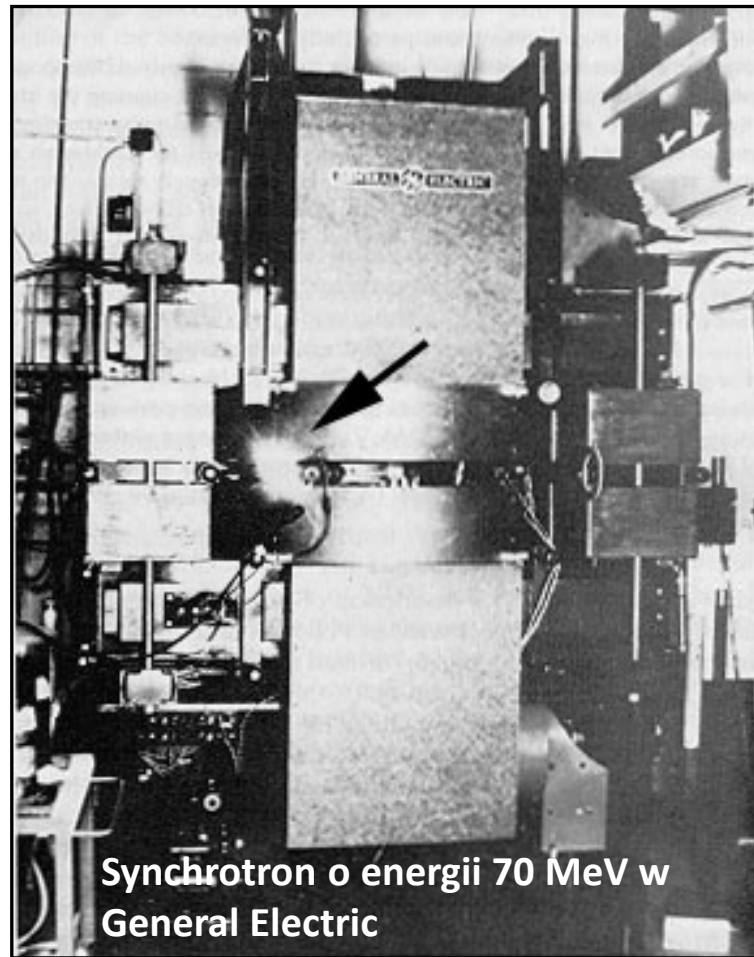
Mgławica Kraba to pozostałość po wybuchu supernowej, który został zaobserwowany przez chińskich i japońskich astronomów w 1054 roku n.e.

W centrum mgławicy znajduje się szybko obracająca się gwiazda neutronowa – pulsar. To właśnie on napędza emisję silnie spolaryzowanej, niebieskawejszej mgławicy synchrotronowej.

Zdjęcie wykonane przy pomocy teleskopu Hubble’a



JAGIELLONIAN UNIVERSITY
IN KRAKÓW



1947 Pierwsza obserwacja promieniowania synchrotronowego w laboratorium

